Microfotografia elettronica che mostra, in sezione, numerose vescicole derivate da ricostituzione spontanea di membrane di cellule rotte del batterio *Escherichia coli*. È ben visibile la struttura a doppio strato della membrana cellulare. Gli strati sono costituiti da molecole con teste idrofile e code idrofobe (*si veda l'illustrazione schematica a pagina 10*). Così, quando frammenti di membrana cellulare vengono mescolati con acqua e agitati, la struttura bilaminare tende verso uno stato di energia libera minima, in cui le code delle molecole risultino protette dall'acqua. Questo stato di energia minima è rappresentato da una bolla. Le vescicole qui raffigurate sono state preparate da H. Ronald Kaback dell'Istituto Roche di biologia molecolare; la microfotografia è stata scattata da Vincent T. Marchesi del National Institute of Arthritis and Metabolic Diseases. L'ingrandimento è di 40 000 X; a questo ingrandimento una cellula di *Escherichia coli* sembrerebbe lunga 10 centimetri.



LE SCIENZE edizione italiana di SCIENTIFIC AMERICAN

numero 92
aprile 1976
anno IX
volume XVI

# Le colicine e l'energetica delle membrane cellulari

*Il trasporto selettivo di certe sostanze all'interno della cellula richiede energia; le colicine, antibiotici prodotti da batteri, possono bloccare questo trasporto attivo e servire così allo studio delle sue modalità di svolgimento*

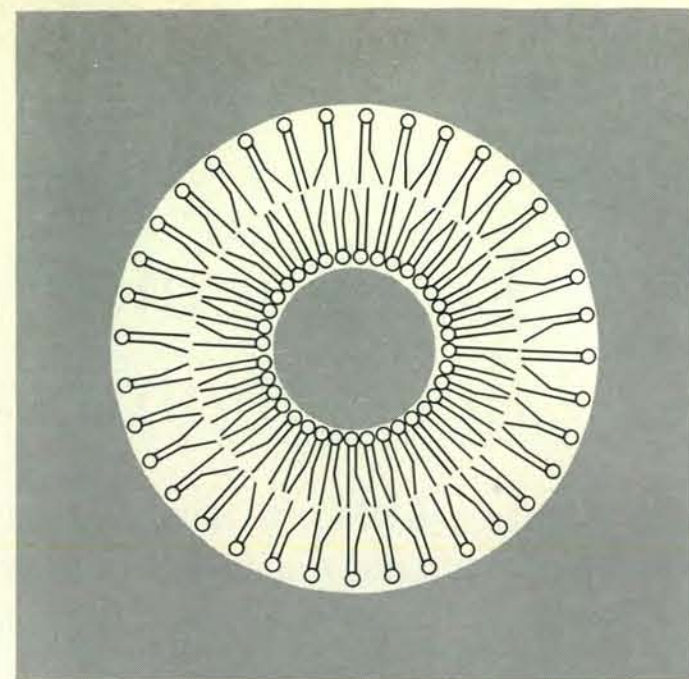
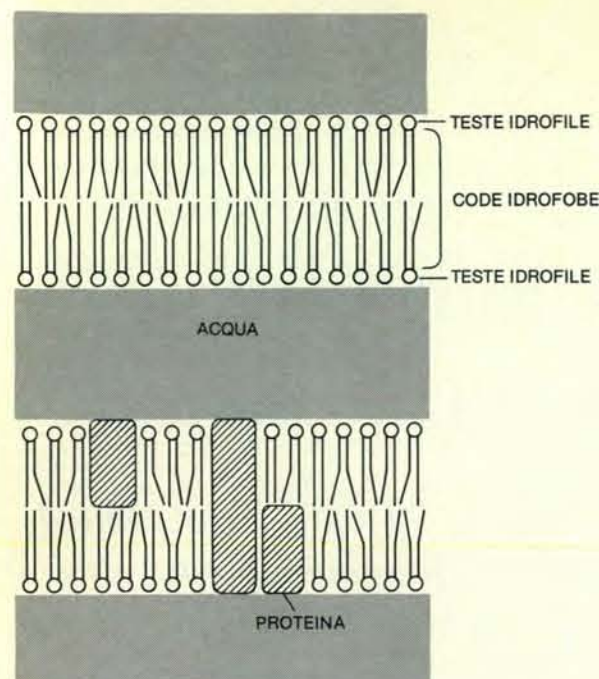
di Salvador E. Luria

La struttura e le funzioni delle membrane cellulari sono oggi studiate con varie tecniche in molti laboratori in tutto il mondo. Uno dei problemi chiave consiste nello spiegare come certe sostanze vengano trasportate attivamente attraverso la membrana, con un processo che richiede un notevole impiego di energia da parte della cellula, mentre altre sostanze sono rigorosamente escluse. Come spesso accade nella ricerca, informazioni utili su un problema di difficile soluzione si ottengono come risultati collaterali di un'indagine condotta in origine con altri obiettivi. Fu appunto per via indiretta che io e i miei collaboratori del Massachusetts Institute of Technology, mentre studiavamo una famiglia di antibiotici denominati colicine, riuscimmo a ottenere alcune informazioni sul modo in cui la membrana cellulare mobilita l'energia necessaria per il trasporto attivo.

Le colicine sono una classe di proteine sintetizzate da numerosi batteri della specie *Escherichia coli*. Ogni colicina è il prodotto di un gene, e geni responsabili delle varie colicine sono generalmente presenti in speciali frammenti di materiale genetico, noti come plasmidi. Le colicine uccidono le cellule appartenenti a ceppi batterici affini ai ceppi che le producono, ma non le cellule di ceppi non affini ad essi. Ci sono molte colicine, probabilmente varie centinaia. Nessuno è riuscito finora a identificare la loro funzione biologica. Si possono correlare a certe proteine di batteriofagi (virus che infettano i batteri) o a proteine delle membrane batteriche. Comunque non ci occuperemo qui di questo problema ancora irrisolto.

Prima di descrivere che cosa siamo riusciti a sapere sul trasporto attivo con il contributo delle colicine, riassumerò brevemente quella che è l'organizzazione delle membrane cellulari. La loro principale componente strutturale è un doppio strato di molecole fosfolipidiche, che hanno teste idrofile (che attraggono acqua) e code idrofobe (che la respingono), per cui, in un ambiente acquoso, si allineano a costituire appunto un duplice strato con le teste rivolte verso l'acqua e le code orientate verso l'interno, lontano dall'acqua (*si veda l'illustrazione a pagina 10*). Se si mescola un fosfolipide con acqua e si agita il miscuglio, le molecole fosfolipidiche formano un addensamento di vescicole chiuse, o serie di bollicine, che così si dispongono perché cercano uno stato di minima energia libera, con tutte le teste a contatto con l'acqua (o all'esterno o all'interno della vescicola) e tutte le code stipate lontano dall'acqua, al centro del doppio strato. Per questo motivo si può pungere una cellula con un ago senza che scoppi o che si sgonfi: le molecole del doppio strato si muovono l'una verso l'altra in modo da chiudere il buco.

Questo materiale che garantisce l'autosaldatura, è solo la componente meccanica, passiva, di una membrana cellulare. Le sostanze vengono trasportate dentro o fuori la cellula da molecole proteiche incluse nella membrana più esterna. Con il crescere della cellula, i componenti del doppio strato lipidico vengono sintetizzati dentro la membrana da enzimi che sono essi pure inclusi in quest'ultima. La membrana è una struttura vivente, dotata di notevole attività; inoltre non è una struttura statica, un mosaico in cui ogni tesserina è fissata là dove le è accaduto di trovarsi o di essere prodotta. Le membrane cellulari sono fluide: le loro componenti sono notevolmente libere di muoversi in senso laterale all'interno dello strato bidimensionale. Le attività funzionali delle membrane possono quindi implicare dei cambiamenti sia nella conformazione delle proteine in esse presenti, sia nella disposizione e nell'associazione di queste proteine.

Ecco la base sulla quale si innesta tutta una serie di problemi relativi alle membrane e su cui si arrovellano i biochimici. In che modo le complesse funzioni delle membrane sono accoppiate all'energia chimica e come sono alimentate da essa? Si consideri una vescicola chiusa delimitata da una membrana, per esempio una cellula batterica, immersa in una soluzione diluita di cloruro di potassio. Benché il doppio strato lipidico sia impermeabile agli ioni potassio, la membrana possiede dei canali di natura proteica che ne permettono il passaggio nel suo spessore. Un batterio può concentrare gli ioni potassio fino a quando la concentrazione di questi all'interno della cellula è anche mille volte superiore

I due strati della membrana cellulare sono costituiti da molecole di fosfolipidi (*in alto a sinistra*), ognuna delle quali possiede una testa idrofila (che attrae acqua) e due code idrofobe (che la respingono). Nella doppia lamina che costituisce la membrana, le code sono rivolte all'interno, le une verso le altre. La membrana dà anche ricetto a molecole proteiche di varie forme (*in basso a sinistra*). In presenza di acqua, il doppio strato lipidico forma una vescicola chiusa (*a destra*), configurazione che riduce al minimo il contatto acqua-grasso. La percentuale di acidi grassi insaturi (code ripiegate) e la temperatura determinano la fluidità del doppio strato lipidico e, indirettamente, controllano l'attività delle proteine dentro o su di esso.

a quella esterna. Un trasporto attivo di questo genere, cioè l'accumulo di una sostanza contro un gradiente di concentrazione, richiede energia, proprio come ne richiede il pompaggio di un liquido verso l'alto per vincere la forza di gravità. Una pompa per l'acqua funziona grazie a un motore elettrico o a qualche altra fonte di energia meccanica. Il trasporto attivo nella cellula viene realizzato, invece, grazie a pompe molecolari, alimentate da energia chimica; i veleni che interferiscono con la produzione di energia nella cellula inibiscono tale funzione.

I sistemi di trasporto attivo costituiscono soltanto una classe delle funzioni della membrana nelle quali è interessata l'energia. L'attività delle cellule nervose e di altre cellule eccitabili dipende dall'esistenza di potenziali elettrici di membrana, generati consumando energia. La contrazione muscolare richiede il passaggio di ioni calcio all'interno e all'esterno di sacche costituite da membrane, un fenomeno che è legato a reazioni esoergoniche. Nelle cellule sensoriali, la conversione in segnali di natura chimica ed elettrica dell'energia contenuta in stimoli luminosi o meccanici è un altro esempio di come l'energia possa essere accoppiata con cambiamenti che si verificano nelle membrane cellulari, il che porta a sua volta alla stimolazione di nervi di senso.

Come si realizza questo accoppiamento energetico? In certi processi che interessano le membrane, l'energia chimica viene fornita dalla scissione dell'adenosintrifosfato (ATP), che può essere considerato la valuta universale per gli scambi energetici delle cellule viventi. Il trasferimento di un gruppo fosforico da una mole di ATP (475 g) all'acqua libera una quantità di energia sufficiente a far fondere 100 g di ghiaccio. Tutta questa energia può essere resa disponibile per pompare sostanze attraverso una membrana. Un esempio ampiamente studiato del ruolo dell'ATP in questo processo è quello relativo all'attivazione delle fibre muscolari. Per allontanare gli ioni calcio dalle fibre muscolari e portarli nelle sacche di membrane, dove si accumulano quando le fibre si rilassano, una particolare molecola proteica cattura due ioni calcio e una molecola di ATP dall'esterno della sacca. Un gruppo fosforico viene quindi trasferito dall'ATP alla proteina in modo tale che, quando esso si distacca, si libera energia. Infine, la proteina «getta» i suoi ioni calcio dentro la sacca.

Questo chiaro schema di funzionamento, risultato di anni di lavori di biochimica complessi e delicati svolti in molti laboratori, mostra ancora una zona oscura: come può l'energia liberata in seguito al distacco del gruppo fosforico diventare disponibile per il trasferimento degli ioni calcio? Si può immaginare, per esempio, una distorsione della proteina vettrice che le permetta di ruotare all'interno della membrana e, alla fine, di riversare i suoi ioni dentro la sacca. Potrebbe anche darsi che la proteina venisse alterata, probabilmente con il contributo di molecole vicine, in modo tale da realizzare un canale, attraverso il quale potrebbero venir fatti passare gli ioni calcio trattenuti da forze elettrostatiche. Sia nello studio dell'azione degli enzimi sia in quello del trasporto attraverso membrane, ogni processo biologico diventa un problema che riguarda la chimica strutturale delle proteine: come, cioè, alterano la propria configurazione le molecole proteiche quando partecipano a certe reazioni chimiche.

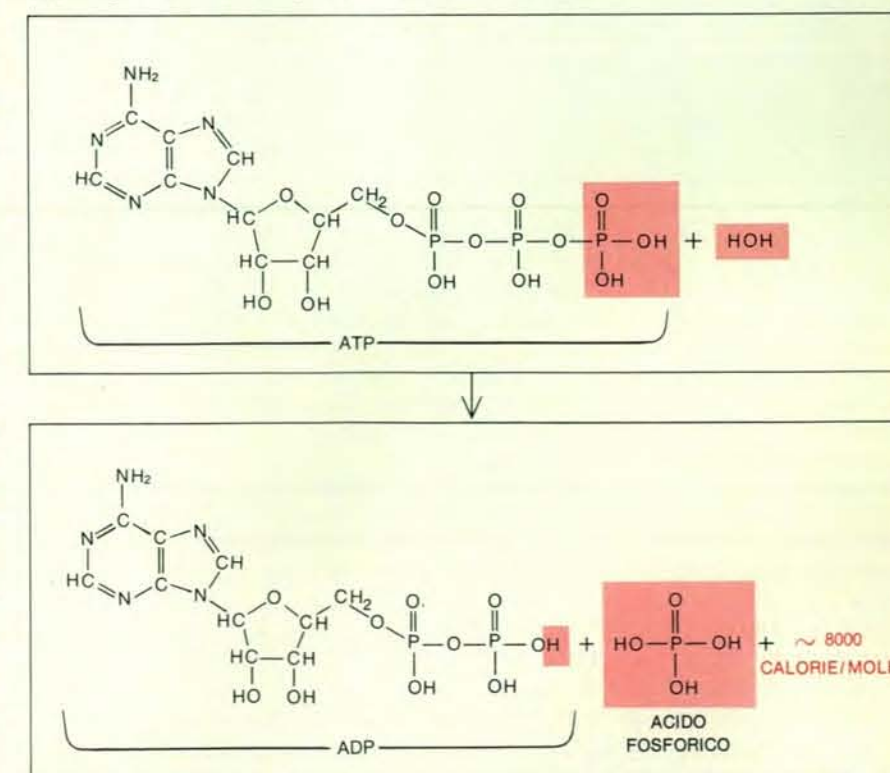
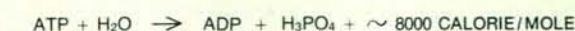
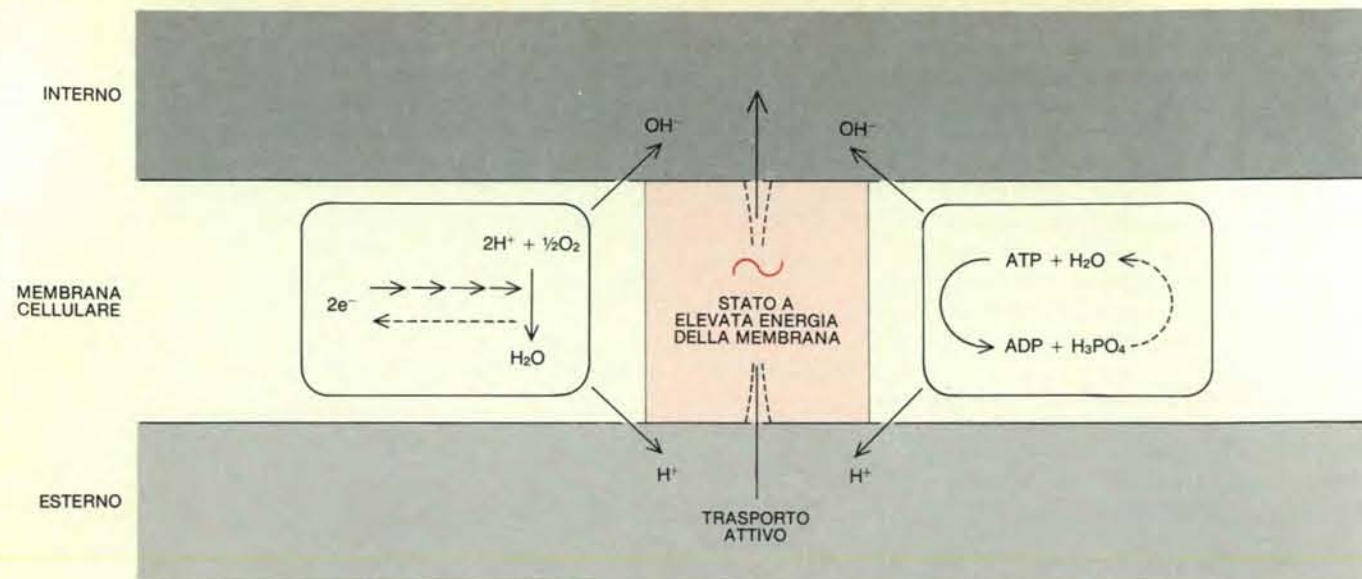
La scissione dell'ATP in ADP (adenosindifosfato) e gruppo fosforico non è la sola fonte di energia chimica per il pompaggio di sostanze attraverso le membrane. Come è noto dal lavoro di Saul Roseman e collaboratori della Johns Hopkins University, certi batteri hanno elaborato un notevole stratagemma per far entrare nella propria cellula zuccheri come il glucosio, servendosi di un donatore di gruppi fosforici diverso dall'ATP. Fatto ancora più interessante, H. Ronald Kaback dell'Istituto Roche di biologia molecolare ha scoperto che, nelle membrane batteriche, il trasporto attivo di molte sostanze, tra cui ioni potassio, amminoacidi e alcuni zuccheri, riceve energia dall'ossidazione di vari composti chimici senza il trasferimento di gruppi fosforici: il meccanismo che fornisce energia è accoppiato più o meno direttamente al processo ossidativo, cioè al trasferimento di elettroni da un potenziale più elevato a uno più basso, per esempio dall'acido lattico all'ossigeno. Il trasferimento di elettroni da uno qualsiasi di numerosi substrati organici all'ossigeno rappresenta la principale fonte di energia per la sintesi di ATP nelle cellule animali e vegetali. Nei batteri, tale processo può fornire, in più, energia per il trasporto attivo anche direttamente, senza passare attraverso l'ATP.

Siamo dunque portati a immaginare uno stato ricco di energia della membrana batterica che appare come una riserva di quell'energia che si libera in seguito al trasferimento di elettroni. Esso può servire a fornire energia per il trasporto attivo e, inoltre, a produrre ATP per le funzioni cellulari. Alternativamente, con il processo inverso, l'ATP prodotto nella cellula può essere utilizzato per generare nella membrana uno stato ricco di energia.

Un modello teorico per lo stato ricco di energia, che incontra il favore di molti ricercatori, è quello proposto da Peter Mitchell dei Glynn Research Laboratories in Inghilterra. Secondo questo modello, l'energia liberata nel trasferimento di elettroni o nel distacco di un gruppo fosforico dall'ATP verrebbe immagazzinata sotto forma di un gradiente di protoni, creato da un meccanismo che scinde l'acqua in modo che i protoni (ioni $H^+$) si accumulino su un lato della membrana e gli ioni ossidrile ($OH^-$) dall'altro lato (*si veda l'illustrazione alla pagina seguente*). Il gradiente di protoni contribuisce a instaurare un potenziale elettrico di circa 200 millivolt attraverso la membrana, la cui faccia interna è dotata di carica negativa. L'energia immagazzinata in un gradiente di protoni, come in un condensatore elettrico, potrebbe essere utilizzata per pompare sostanze all'interno della cellula in vari modi, per esempio associando uno o più protoni con una molecola vettrice specifica, che diventa pertanto capace di trasportare il proprio substrato attraverso la membrana. Questo modello lascia ancora aperta la questione degli effettivi cambiamenti molecolari che interessano il legarsi della molecola vettrice al substrato, il trasporto di questo attraverso la membrana e il suo riversamento in una regione di concentrazione più elevata qual è l'interno della cellula.

Dopo aver delineato, a mo' di sfondo, gli aspetti fondamentali del trasporto attivo, descriverò ora tutto quello che abbiamo potuto dedurre dalle nostre ricerche con le colicine, alle quali abbiamo incominciato a interessarci nel 1963. Le colicine furono scoperte una cinquantina

Per lo spostamento di una sostanza qualsiasi da una regione di minore a una di maggiore concentrazione occorre energia. La cellula può concentrare molte sostanze centinaia o migliaia di volte più che nel liquido circostante realizzando un trasporto attivo, che pompa selettivamente certe sostanze attraverso la membrana verso un valore di concentrazione più elevato all'interno della cellula che non all'esterno. L'energia libera $\Delta G$ necessaria può essere calcolata mediante un'equazione. Una fonte importante di energia chimica a disposizione della cellula è rappresentata qui sotto.

$$ATP + H_2O \rightarrow ADP + H_3PO_4 + \sim 8000 \text{ CALORIE/MOLE}$$

Dall'adenosintrifosfato (ATP), valuta universale per gli scambi energetici cellulari, viene liberata energia chimica quando un gruppo fosforico si stacca ed è trasferito all'acqua, dando adenosindifosfato (ADP) e acido fosforico. L'energia contenuta nell'ATP può essere conservata e utilizzata non appena è necessaria per il trasporto attivo.

**Lo stato ad elevata energia della membrana si produce o per trasferimento di elettroni da varie sostanze all'ossigeno (*riquadro a sinistra*) o per idrolisi dell'ATP, con formazione di ADP e di acido fosforico (*a destra*). Ambedue questi processi liberano energia. Secondo la teoria chemiosmotica di Peter Mitchell, ambedue i processi sono orientati nella membrana in modo da far sì che i protoni ($H^+$) si accumulino all'esterno della membrana stessa e gli ioni ossidrile ($OH^-$) all'interno. In tal modo l'energia prodotta viene immagazzinata come un gradiente di protoni. La risultante forza « protonimotrice » arricchisce di energia il meccanismo del trasporto attivo, indicato con un tratteggio a forma di imbuto. La forza « protonimotrice » può anche fornire energia alle reazioni inverse di quelle di idrolisi dell'ATP e di trasferimento degli elettroni (*frecce tratteggiate*).**

d'anni fa dal batteriologo belga André Gratia e studiate in seguito da Pierre Fredericq in Belgio e da Masayasu Nomura negli Stati Uniti. Sembra che siano classificabili in tre gruppi, a seconda del modo in cui uccidono i batteri che sono sensibili ad esse. Per ogni gruppo esiste un bersaglio biochimico specifico, cioè una funzione cellulare che è bloccata dall'azione della colicina. Una classe di colicine, designata come *E 2*, lede il DNA; una seconda classe, l'*E 3*, danneggia i ribosomi, che sono una componente essenziale del congegno cellulare di sintesi proteica. Non ci occuperemo qui né della classe *E 2*, né della classe *E 3*, ma del terzo gruppo, esemplificato dalla colicina *E 1* e dalla colicina *K*, simili per il modo in cui agiscono; la loro azione ha un notevole peso per i meccanismi energetici legati alle membrane.

Quando cellule di *Escherichia coli*, sensibili alla colicina *E 1* o alla colicina *K*, assorbono l'una o l'altra di queste due sostanze, sembra che un'intera serie di cose cominci ad andar male. La sintesi delle macromolecole (proteine, DNA, RNA e glicogeno) si blocca quasi subito; questo effetto fu osservato una ventina di anni fa e fece pensare che le colicine danneggiassero qualche meccanismo fondamentale della cellula. Quando cominciai a lavorare con le colicine nel 1963, ero spinto dall'idea che potessero influire su qualche meccanismo fondamentale di controllo delle sintesi cellulari. Trovai subito che il campo d'azione sia della colicina *E 1* sia della colicina *K* era ancora più ampio: Il trattamento di batteri con le due sostanze citate bloccava subito il trasporto attivo del lattosio, di vari amminoacidi e degli ioni potassio. Le cellule continuavano tuttavia ad assorbire e ad accumulare glucosio, il cui trasporto attivo, come ho ricordato, riceve energia da un meccanismo speciale. Questa capacità indicava che esse erano rimaste intatte, anche se non riuscivano più ad assorbire le altre sostanze.

Ci accorgemmo ben presto che mancava soltanto la fase attiva del trasporto, cioè l'accumulo di varie sostanze contro un gradiente di concentrazione, un processo che richiede un apporto di energia. I meccanismi molecolari che presiedono allo scambio di substrati attraverso la membrana cellulare senza dispendio energetico erano invece ancora funzionanti. Questi risultati ci fecero pensare che l'attività della colicina consistesse nell'inibire qualche fase dell'utilizzazione dell'energia.

Le ricerche furono realizzate in collaborazione con Kay Fields, un mio studente ora all'University College di Londra. Da allora una serie di risultati ottenuti dal nostro gruppo (di cui hanno fatto parte in vari periodi Gregory Brewer, David S. Feingold, Anton e Els Jetten, Joan Lusk, Charles Plate, Sohair Sabet e Joan L. Suit) ci ha condotto alle idee attuali sul rapporto tra colicine *E 1* e *K* e i sistemi di accoppiamento energetico nella membrana batterica.

Può essere utile descrivere la natura di questi esperimenti un po' più nei particolari. Le molecole di colicina si attaccano a un recettore specifico, presente sul batterio. Sabet, lavorando presso il laboratorio di Carl A. Schnaitman alla University of Virginia School of Medicine prima di unirsi al nostro gruppo, aveva isolato i recettori specifici per alcune colicine e mostrato che si trattava di molecole proteiche localizzate nella parete esterna del batterio, costituita da lipopolisaccaridi. Questa parete è un involucro resistente, relativamente inerte; la membrana metabolicamente attiva, cioè la sede di processi come il trasporto attivo, il trasferimento di elettroni, la produzione di ATP e la sintesi di vari componenti propri, è la membrana interna, o citoplasmatica.

Quando la colicina è attaccata più o meno solidamente a un recettore, la cellula batterica si trova in uno stadio che abbiamo denominato stadio I e viene uccisa quando entra nello stadio II. Fino a che rimane nella condizione di partenza, la cellula è ancora normale dal punto di vista funzionale e può essere salvata se si aggiungono all'insieme di cellule e colicina certi agenti, come l'enzima tripsina che digerisce la colicina. La transizione dall'uno all'altro stadio viene determinata mediante esperimenti in cui si misura quante cellule possono essere salvate dalla tripsina aggiungendo questa in vari momenti dopo l'aggiunta della colicina. I risultati sono lineari: la transizione dallo stadio I (salvabile) allo stadio II (irrecuperabile) è una reazione di primo ordine, che avviene in una sola fase e la cui velocità è direttamente proporzionale alla quantità di colicina presente. Anche l'interpretazione è lineare: ciò che uccide una cellula è l'azione di una sola molecola di colicina. Aumentando la quantità di quest'ultima si aumenta soltanto la probabilità di eventi letali per unità di tempo.

Prima di parlare della biochimica del processo letale a carico della cellula batterica, si dovrebbe far rilevare che la transizione tra stadio I e stadio II è di per se stessa un fatto interessante. In primo luogo, come ha dimostrato Plate, la sua velocità dipende nettamente dallo stato chimico-fisico dei lipidi presenti nella membrana citoplasmatica. Se si rendono meno fluidi questi lipidi, o abbassando la temperatura o costringendo le cellule a incorporare tra essi un acido grasso insolito, la transizione che porta alla morte della cellula viene notevolmente ritardata. Perché la colicina possa uccidere una cellula, la membrana cellulare deve pertanto trovarsi in uno stato fluido. Questo fatto fa pensare o che la colicina debba effettivamente essere trasportata attraverso lo strato lipidico o che le reazioni successive al suo attacco richiedano per i lipidi uno stato fluido.

**Le cellule di *Escherichia coli* dispongono di tre sistemi di trasporto attivo. L'arricchimento di energia da parte della membrana basta alla realizzazione del trasporto attivo del lattosio e di molte altre sostanze, tra le quali gli ioni potassio e magnesio. Il trasporto di una seconda classe di sostanze, tra le quali la glutammina, richiede invece la partecipazione dell'ATP come tale. Il trasporto di una terza classe di sostanze, comprendente ad esempio il glucosio, richiede invece la presenza di acido fosfoenolpiruvico (PEP). La colicina *K* blocca i primi due sistemi di trasporto, ma non blocca il terzo.**

Ancor più interessante è il fatto che, perché la cellula possa venir uccisa, la membrana citoplasmatica debba trovarsi in uno stato ricco di energia. Qualsiasi trattamento chimico che interferisca con il flusso dell'energia nella membrana mantiene le cellule trattate con la colicina nello stadio I, cioè conserva loro la possibilità di recupero da parte della tripsina. Perché è necessaria un'energia di membrana per passare dallo stadio I allo stadio II? Rinvierò l'interpretazione a quando avrò maggiormente descritto il modo in cui le cellule batteriche vengono uccise dalle colicine.

Ho già detto che l'uccisione delle cellule batteriche ad opera delle colicine *E 1* o *K* inibisce il funzionamento di vari sistemi di trasporto attivo. L'inibizione viene scoperta nello spazio di pochi secondi dopo che le cellule hanno raggiunto lo stadio II, quando non possono più essere salvate dalla tripsina. Si verifica pure un altro evento: il livello di ATP nella cellula si abbassa tra il 30 e il 50 per cento, a seconda delle condizioni in cui l'esperimento si svolge. Poiché questo composto rappresenta la valuta di scambio energetico della cellula ed è probabile che molti processi siano sensibili alla quantità di esso presente nella cellula stessa, parve ragionevolmente possibile che l'abbassamento del livello di ATP fosse l'effetto primario dell'azione della colicina *K*.

Abbiamo seguito questa pista molto attraente per un certo tempo, ma essa non conduceva ad alcuna meta, mentre nell'ultimo anno, più o meno, abbiamo potuto acquisire una miglior cognizione del problema. Stavamo lavorando con batteri *Escherichia coli* normali e decidemmo per un certo numero di ragioni di esaminare determinati ceppi mutanti, privi nella membrana dell'enzima ATPasi (adenosintrifosfatasi), un enzima che ha la funzione sia di catalizzare la sintesi dell'ATP, utilizzando l'energia liberata nel trasferimento di elettroni in seno alla membrana citoplasmatica, sia di scindere l'ATP per fornire energia alla membrana. I batteri privi di ATPasi hanno per così dire un comportamento schizoide nei riguardi dell'energia: possono utilizzare il glucosio o altri zuccheri per produrre ATP all'interno della cellula e possono anche utilizzare una qualsiasi di varie sostanze come fonte di elettroni per fornire energia alla membrana; sono invece incapaci sia di produrre ATP servendosi dell'energia liberatasi col trasferimento di elettroni sia di utilizzare l'ATP per dare energia alla membrana.

L'azione della colicina *K* sui batteri privi di ATPasi è risultata significativamente diversa da quella sui batteri normali e le differenze sono state illuminanti. I livelli di ATP si sono alzati anziché abbassarsi e la sintesi delle proteine e degli acidi nucleici è continuata anziché bloccarsi, mentre i vari tipi di trasporto attivo venivano completamente inibiti proprio come lo erano nei batteri normali. Il blocco della sintesi proteica e della sintesi degli acidi nucleici, che avevamo pensato essere la causa principale della morte della cellula, era soltanto, in realtà, un effetto collaterale dell'azione della colicina, probabilmente un riflesso dell'abbassamento dei livelli di ATP. L'azione chiave della colicina, come scoprimmo alla fine, riguardava l'utilizzazione dell'energia di membrana.

Perché la colicina farebbe scendere i livelli di ATP nei batteri normali e li farebbe salire nei mutanti privi di ATPasi? Noi pensiamo che la colicina *K*, privando la membrana di energia, provochi per dir così un drenaggio di quest'ultima dalla cellula. Se è presente l'enzima ATPasi, la colicina produce uno sperpero di ATP cellulare in un vano tentativo di arricchire nuovamente la membrana di energia. Si può fare un paragone con una pompa che riesca a vuotare un serbatoio d'acqua nel tentativo di riempire una vasca che perde. Nei batteri mutanti privi di ATPasi, non si ha perdita di energia da colicina; il livello dell'ATP all'interno della cellula effettivamente sale e la sintesi di macromolecole continua. Queste cellule sono morte solo perché un corpo estraneo si è inserito nel meccanismo che fornisce energia alla membrana.

Quest'interpretazione è stata validamente sostenuta da un elegante esperimento eseguito dalla Lusk, che oggi si trova alla Brown University. Pensando che gli ioni potassio e magnesio sono probabilmente le sostanze essenziali che la cellula deve pompare dall'esterno nel suo interno, questa ricercatrice ha trattato i batteri mutanti privi di ATPasi con colicina *K* e quindi li ha posti in un mezzo di coltura contenente potassio e magnesio ad elevate concentrazioni. Essa ha trovato che, in questo mezzo, le cellule mutanti invece di venir uccise sopravvivevano, si dividevano e davano origine a discendenti indenni e mutanti!

In quale specifica maniera la colicina interviene sull'accoppiamento tra energia di membrana e trasporto attivo? Esistono numerose sostanze, come il cianuro, che, bloccando il trasporto degli elettroni, sottraggono energia alle membrane. La colicina *K* non fa questo: in batteri trattati con essa, la velocità di flusso degli elettroni da vari substrati all'ossigeno è normale. Altre sostanze sottraggono energia alle funzioni della membrana bloccando la conversione dell'energia che proviene dal trasferimento di elettroni in energia di membrana utilizzabile; esse facilitano il passaggio di protoni attraverso le membrane e annullano il gradiente di protoni che è all'origine dell'accumulo di energia nelle membrane stesse. La colicina *K* non agisce neppure in questo modo, cioè non annulla il gradiente di protoni; inoltre, inibisce alcuni sistemi di trasporto che non sono sensibili alle sostanze citate or ora. Brewer, utilizzando nei suoi esperimenti una sostanza la cui fluorescenza riflette l'esistenza di potenziali elettrici attraverso la membrana, ha trovato che l'effetto prodotto dalla colicina consiste in un abbassamento del potenziale. Questo potrebbe essere il risultato di un'azione che interferisce con la realizzazione e il mantenimento dello stato ricco di energia o da parte dell'ATP o per trasferimento di elettroni.

Un modo di considerare l'accoppiamento dell'energia di membrana con il trasporto attivo o la sintesi dell'ATP è quello di supporre che l'energia sia incanalata, entro la membrana, verso vari sistemi non direttamente per cambiamenti di carica elettrica e di conformazione dell'ATPasi o delle molecole vettrici, ma tramite l'azione di una o più proteine, la cui deformazione è in qualche modo trasmessa ai vettori effettivi. La colicina *K* potrebbe agire su alcune tappe intermedie e quindi potrebbe inibire un certo numero di differenti sistemi di trasporto. Se quest'ipotesi è valida, si dovrebbero trovare batteri mutanti in cui le tappe intermedie risultassero alterate. In effetti, Plate è riuscito a isolare alcuni mutanti di *Escherichia coli* che sono divenuti resistenti alla colicina *K* e che hanno subito un'alterazione in un modo o nell'altro per quanto riguarda l'accoppiamento dell'energia di membrana con varie funzioni di trasporto. Perlomeno uno di questi mutanti contraffà l'azione della colicina *K* e può alterare il bersaglio primario su cui questa sostanza agisce. Questi risultati danno sostegno all'idea che l'accoppiamento energetico implichi un certo numero di tappe diverse e schiuda la via alla possibilità di utilizzare il metodo dell'indagine genetica per studiare i meccanismi energetici della membrana. È ora in programma l'isolamento di una serie di mutanti, ognuno dei quali carente di uno dei componenti del sistema di accoppiamento energetico, e l'identificazione delle corrispondenti funzioni biochimiche.

Come ho detto, una proprietà comune alle colicine di differenti classi è che esse possono uccidere soltanto batteri la cui membrana sia in uno stato ricco di energia. In altre parole, la transizione tra stadio I e stadio II richiede energia di membrana. Anton Jetten, che ha studiato il fenomeno nei particolari, ha trovato che, in assenza di ossigeno, i batteri carenti di ATPasi fissano la colicina senza tuttavia subirne danni anche quando vengano abbondantemente riforniti di ATP: in assenza di ossigeno, la membrana non raggiunge uno stato ricco di energia; non appena ritorna l'ossigeno, i batteri incominciano a morire.

Mentre ci stavamo rompendo il capo sul significato di questo risultato, una scoperta effettuata nel laboratorio di Kaback ha offerto una suggestiva analogia. Kaback e collaboratori stavano studiando in *Escherichia coli* l'interazione chimica tra un certo tipo di zucchero e le molecole che lo trasportano all'interno della membrana. Essi hanno trovato che non si verificava alcuna interazione se la membrana non era ricca di energia, come se fosse necessaria dell'energia perché le molecole vettrici entrassero in contatto con le molecole dello zucchero. I requisiti necessari per l'interazione chimica erano identici a quelli per le colicine, nella transizione tra lo stadio I e lo stadio II.

Si è tentati di proporre un'audace generalizzazione e di pensare che il processo di arricchimento di energia della membrana faccia sì che le varie proteine che agiscono da trasportatori o da recettori diventino accessibili ai loro rispettivi substrati. Cambiamenti nel potenziale di membrana, ad esempio, potrebbero provocare cambiamenti di conformazione nelle molecole proteiche, sì da farle sporgere dalla membrana o da ricacciarle all'interno. Tali cambiamenti potrebbero anche essere interessati nel funzionamento di canali per il passaggio di ioni, la cui apertura e chiusura sono eventi di primaria importanza nelle membrane eccitabili dei nervi e dei muscoli.

L'accessibilità dei recettori al substrato non può, naturalmente, costituire l'intera storia dell'utilizzazione dell'energia di membrana. Il trasporto attivo, che implica non il passaggio di un numero relativamente piccolo di ioni attraverso una membrana, ma un massiccio accumulo di substrati contro gradienti di concentrazione, necessita anche di un dispendio di energia per riversare i substrati all'interno della cellula. Anche questo fatto può essere realizzato grazie a cambiamenti di conformazione delle proteine della membrana. Il far luce sugli eventi molecolari che conferiscono alle membrane cellulari le loro proprietà funzionali si presenta come un compito arduo, ma affascinante.

L'effetto letale della colicina *K* su *Escherichia coli* può essere valutato confrontando il numero di cellule sopravvissute fra quelle esposte a diverse concentrazioni di colicina, e determinando quante di esse possono venire « salvate » aggiungendo tripsina, un enzima che distrugge le molecole di colicina. Le cellule batteriche vengono mescolate con colicina *K* alla concentrazione di un microgrammo (*a sinistra*) o di mezzo microgrammo (*a destra*) per centimetro cubo. Dopo cinque minuti, ambedue i miscugli vengono diluiti e si prelevano campioni dei miscugli diluiti a determinati intervalli, saggiandone poi la capacità a produrre colonie su agar (*linee in nero*). Le colonie che sopravvivono rappresentano i batteri che non hanno ricevuto una dose letale di colicina. Le linee in colore indicano le frazioni di cellule batteriche che possono essere salvate mescolandole con forti quantitativi di tripsina, quindi le percentuali di cellule non ancora uccise al momento dell'aggiunta dell'enzima. Il fatto che le linee in colore siano rette con inclinazioni proporzionali alle quantità di colicina indica che l'azione di un'unica molecola di colicina è sufficiente a uccidere una cellula di *Escherichia coli*.

| | ATPasi PRESENTE | ATPasi ASSENTE |
|---|---|---|
| SINTESI PROTEICA | SI BLOCCA | PROSEGUE |
| SINTESI DI DNA E DI RNA | SI BLOCCA | PROSEGUE |
| LIVELLO DELL'ATP | SI ABBASSA | SI ALZA |
| MOTILITA' | SI BLOCCA | SI BLOCCA |
| TRASPORTO ATTIVO DEL GLUCOSIO | PROSEGUE | PROSEGUE |
| TRASPORTO ATTIVO DI GLUTAMMINA, LATTOSIO, ECC. | SI BLOCCA | SI BLOCCA |

Gli effetti della colicina *K* differiscono in maniera significativa a seconda che le cellule di *Escherichia coli* siano normali o siano mutanti privi dell'adenosintrifosfatasi (ATPasi). L'ATPasi è un enzima in grado di catalizzare o la sintesi di ATP, utilizzando l'energia del flusso di elettroni attraverso la membrana citoplasmatica, o la reazione inversa, cioè l'idrolisi dell'ATP per fornire energia alla membrana stessa. Quando si aggiunge colicina *K* a cellule che contengono ATPasi, la sintesi delle proteine, del DNA e dell'RNA si blocca e il livello dell'ATP all'interno della cellula cade rapidamente. Quando si aggiunge colicina *K* a cellule mutanti, si nota uno scarso effetto sulla sintesi delle proteine, del DNA e dell'RNA, mentre il livello dell'ATP subisce un aumento.



La differenza tra azione della colicina *K* sulle cellule di *Escherichia coli* normali e azione su cellule mutanti prive di ATPasi fa luce sul modo in cui avviene il rifornimento di energia per produrre quello stato ad elevata energia della membrana, che è necessario per il trasporto attivo. Nelle cellule normali (*in alto*) la colicina *K* blocca il trasporto attivo per drenaggio dell'energia contenuta nella membrana. Nel vano tentativo di conservare lo stato ad elevata energia, all'interno della membrana l'ATP viene idrolizzato in ADP e va così sprecato; come risultato, il suo livello all'interno della cellula si abbassa. Anche in un batterio mutante privo di ATPasi (*in basso*) il trasporto attivo si arresta dopo esposizione alla colicina *K*, a causa del drenaggio dell'energia presente nella membrana, ma non si verifica alcuna idrolisi di ATP all'interno della membrana stessa e, pertanto, non ne consegue alcuno spreco. All'interno della cellula, l'ATP continua ad essere prodotto a partire dal glucosio. Il suo livello in effetti sale, probabilmente perché la cellula danneggiata lo utilizza in misura minore per i processi metabolici.

# Raggi X da resti di supernova

*Una supernova che esplode lancia, nel mezzo interstellare, un involucro di gas. Nella regione in cui il gas dell'involucro incontra il gas del mezzo sono prodotti raggi X che ci forniscono informazioni su entrambi*

di Philip A. Charles e J. Leonard Culhane

Dalla scoperta della prima sorgente cosmica di raggi X nel 1964 sono stati rilevati e catalogati circa 170 di tali oggetti. Alcuni di essi sono associati a resti di supernova: uno strato di gas in espansione espulso nell'esplosione catastrofica di una stella massiccia al termine del suo ciclo evolutivo. Talvolta, come nel caso della Nebulosa del Granchio nella costellazione del Toro, il nucleo piccolo e denso della stella, che rimane dopo l'esplosione, si è contratto fino a diventare un pulsar, cioè una stella di neutroni in rapida rotazione che emette attorno a sé elettroni di alta energia. Gli elettroni, muovendosi a spirale lungo le linee di forza del campo magnetico della stella, irradiano per sincrotrone emettendo onde radio, luce visibile e raggi X.

Fino a non molto tempo fa si riteneva che altri resti di supernova che emettono raggi X, quali Cassiopeia A e il resto della nova di Tycho del 1572, dovessero irraggiare con un meccanismo analogo. Un fatto contrastava però con tale ipotesi: la quantità di energia irradiata dalla Nebulosa del Granchio è centinaia di volte maggiore di quella emessa da Cassiopeia A e dal resto della nova di Tycho, nonostante che tali resti siano molto più giovani della Nebulosa del Granchio. Evidentemente la loro sorgente di energia è molto diversa dal pulsar che si trova al centro della Nebulosa del Granchio.

Nell'agosto 1972 fu lanciato il satellite *Copernicus* della serie OAO (*Orbiting Astronomical Observatory*: Osservatorio astronomico orbitante). Esso portava a bordo tre telescopi a incidenza radente per raggi X del Mullard Space Science Laboratory dell'University College di Londra. Facendo uso di tali strumenti abbiamo ottenuto, insieme coi nostri collaboratori, nuovi dati ad alta risoluzione su alcuni resti di supernova. La mappa a raggi X di Cassiopeia A che abbiamo tracciato, insieme con lo spettro tratto dagli stessi dati, suggerisce che i raggi X non sono emessi da qualche sorgente centrale, ma da gas a elevata temperatura prodotto da onde d'urto generate dall'esplosione originaria, che viaggiano attraverso il mezzo interstellare.

Che cosa fa sì che una stella diventi una supernova? Sebbene tuttora non sia completamente chiaro perché certe stelle esplodano catastroficamente e altre no, la successione degli eventi che portano all'esplosione è abbastanza ben compresa. La natura del ciclo evolutivo di una stella è determinata da due fattori principali. Il primo è la forza di gravità. La stella nasce da una nube di gas che si contrae per la reciproca attrazione gravitazionale delle particelle che la compongono. Tale forza gravitazionale fa sì che il collasso continui inesorabilmente. D'altra parte, poiché la nube si contrae, la temperatura nel suo interno cresce continuamente. Dopo un tempo che può variare, a seconda della massa iniziale della nube, da centomila a cento milioni di anni, la temperatura è sufficientemente elevata da permettere l'instaurarsi di reazioni nucleari nell'interno profondo della stella. Da questo momento in poi è il bilancio tra la gravità e le reazioni termonucleari che determina il cammino evolutivo della stella. Essa evolve con periodi di contrazione gravitazionale arrestata di volta in volta dall'energia prodotta nelle reazioni di fusione.

Per quanto grandi possano essere le riserve energetiche di una stella, esse non sono illimitate. Le prime reazioni di fusione trasformano l'idrogeno in elio. Dal momento che l'idrogeno è inizialmente l'elemento più abbondante nella stella, la fase iniziale della vita di una stella dura a lungo. Quando l'idrogeno è esaurito, la stella si contrae finché la sua temperatura interna è sufficientemente elevata da trasformare l'elio in carbonio. Esauritosi l'elio, il processo si ripete per elementi più pesanti. Ogni singola reazione tra gli elementi più pesanti fornisce però una quantità di energia minore di quella prodotta dalla reazione equivalente tra elementi più leggeri. Inoltre l'abbondanza di ogni elemento più pesante disponibile per le reazioni di fusione è minore di quella dei precedenti elementi più leggeri. Pertanto il periodo in cui la contrazione gravitazionale della stella può essere compensata dalle reazioni di fusione diventa sempre più breve, finché la stella si avvicina alla fine del suo « combustibile nucleare ».

Ciò che avviene a questo punto è funzione della massa della stella. Una stella che sia meno massiccia del Sole può evolversi lentamente e direttamente fino a raggiungere lo stadio di nana bianca, in cui possiede un nucleo non comprimibile composto essenzialmente da elettroni strettamente impaccati. Per una stella parecchie volte più pesante del Sole gli ultimi stadi evolutivi possono procedere molto rapidamente, terminando qualche volta in maniera violenta.

Nella maggior parte dei casi, quando la stella ha consumato le sue ultime riserve di combustibile nucleare, il collasso gravitazionale diventa alla fine il fattore dominante. Per breve tempo, forse solo per pochi secondi, il collasso prosegue senza freni, accelerato dalla fuga di neutrini e di altre particelle nucleari che sottraggono grandi quantità di energia al nucleo della stella. Alla fine la materia del nucleo stellare è compressa in uno stato superdenso in cui elettroni e protoni non esistono più come particelle indipendenti, ma sono fusi insieme così che l'intero nucleo è composto di neutroni. Una stella di neutroni siffatta ha una densità paragonabile a quella del nucleo di un atomo: $10^{15}$ grammi per centimetro cubo.

Al termine del ciclo evolutivo di una stella particolarmente massiccia nemmeno la densità estremamente elevata dei neutroni strettamente impaccati è sufficiente ad arrestare il collasso gravitazionale finale. In tal caso la stella può contrarsi ulteriormente fino a diventare un buco nero: un oggetto cioè il cui campo gravitazionale è così intenso che neppure la luce che emette può sfuggire. In tempi ancora recenti i buchi neri esistevano solo nell'ambito delle congetture teoriche. Negli ultimi anni, però, prove significative ottenute mediante osservazioni nella banda X dello spettro suggeriscono che un oggetto collassato così massiccio possa effettivamente trovarsi nella costellazione del Cigno (si veda in proposito l'articolo *Sorgenti di raggi X in sistemi binari* di Herbert Gursky e Edward P. J. van den Heuvel in « Le Scienze », n. 83, luglio 1975).

I dettagli relativi alla fase ultima del collasso dell'oggetto sono poco noti. Si

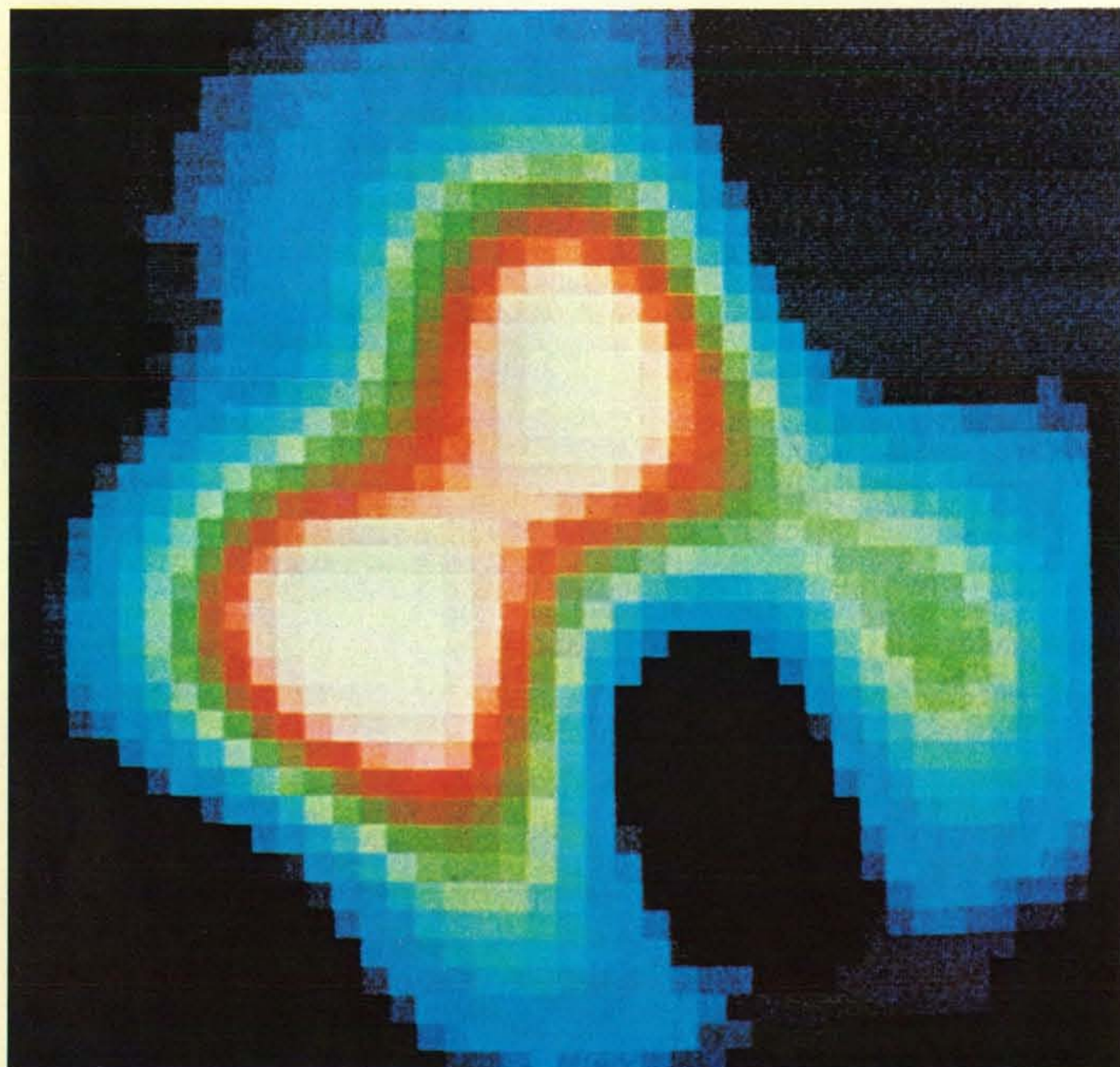
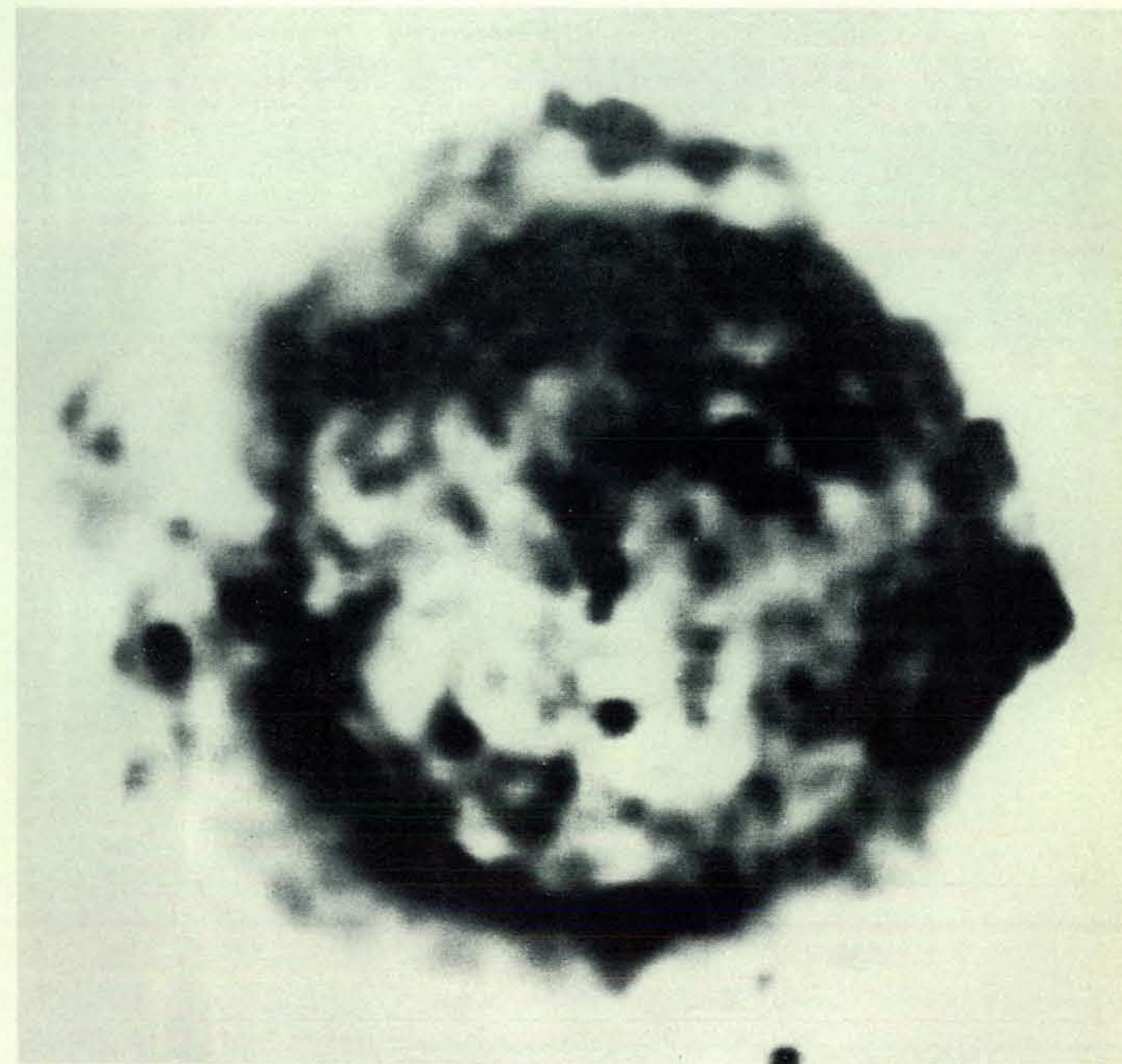
**Mappa a raggi X di Puppis A, il resto di una supernova che esplose nella costellazione della Poppa e la cui luce raggiunse la Terra 4000 anni fa, ottenuta coi dati ricevuti dai telescopi per raggi X a incidenza radente del Mullard Space Science Laboratory a bordo dell'Osservatorio astronomico orbitante *Copernicus*. R. J. Borken dell'Università del Wisconsin ha riprodotto i dati con un tubo a raggi catodici e lo ha fotografato per ottenere la mappa. I colori rappresentano la distribuzione dell'intensità dei raggi X nella sorgente: le aree bianche corrispondono alla massima intensità, quelle blu alla minima. Le zone più luminose sono verosimilmente regioni in cui l'onda d'urto prodotta dall'esplosione originaria ha incontrato nel mezzo interstellare una densa nube di gas, che è così diventata una sorgente più intensa di raggi X « molli » (cioè di bassa energia).**

ritiene che la stella diventi instabile non appena il collasso ha inizio. L'instabilità aumenta rapidamente fino al momento in cui la stella espelle i suoi strati più esterni in una gigantesca esplosione. Il materiale espulso, che talvolta raggiunge il 90 per cento della massa iniziale della stella, incomincia il suo tragitto nel mezzo interstellare, mentre ciò che resta della stella acquista nuovamente stabilità o come una stella piccola, ma relativamente normale, o come una stella di neutroni.

La Nebulosa del Granchio costituisce la dimostrazione silenziosa di una stella che è passata attraverso questa successione di eventi e rappresenta uno dei più interessanti resti di supernova conosciuti. Essa irradia una quantità di energia 10 000 volte maggiore di quella emessa dal Sole, nonostante che la supernova che la produsse sia esplosa quasi 1000 anni fa, nel 1054. Sembrava impossibile trovare una spiegazione plausibile di come la nebulosa potesse emettere tale enorme quantità di energia fino a quando, nel 1967, si arrivò a individuare il primo pulsar nella costellazione della Vulpecula.

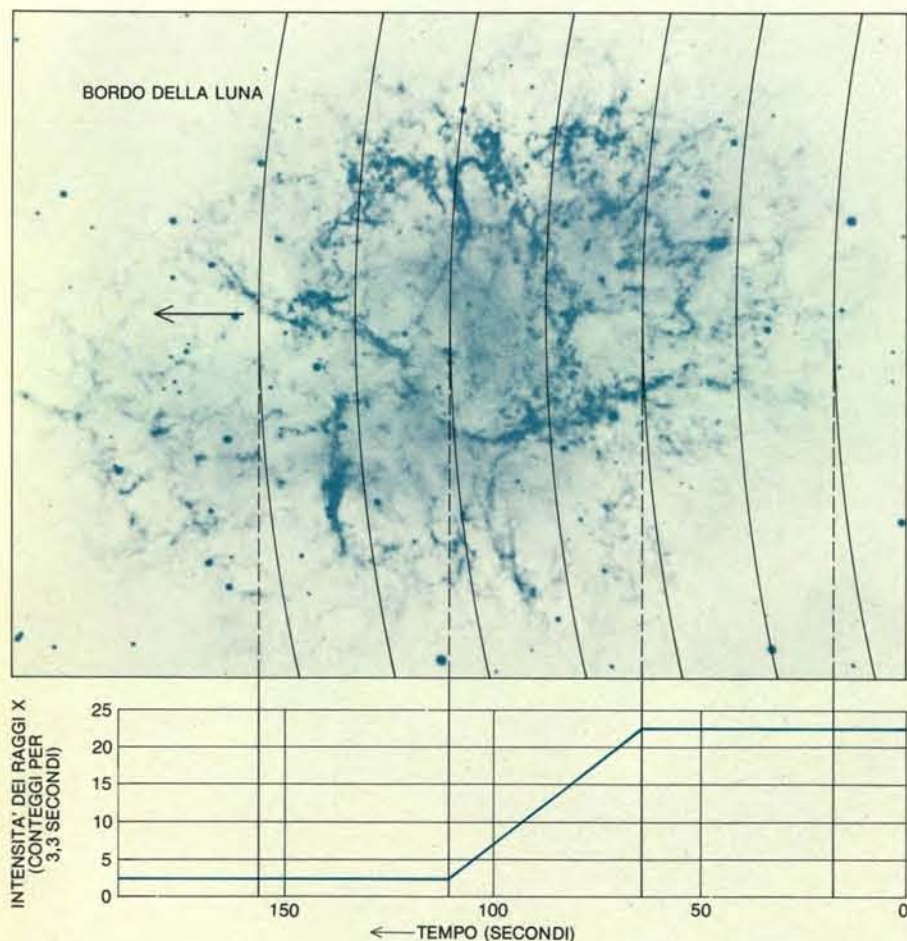
Fu Thomas Gold della Cornell University che propose che un pulsar fosse una stella di neutroni in rapida rotazione e dotata di un intenso campo magnetico. La stella di neutroni ruota velocemente perché ha conservato gran parte del momento della quantità di moto che possedeva come stella normale, sebbene possa avere un diametro di soli 20 chilometri. Le linee di forza del campo magnetico sono trascinate dalla stella nella sua rotazione. Il pulsar emette elettroni e la sua grande energia rotazionale li accelera fino a velocità prossime a quella della luce. Se il pulsar è avvolto in una nebulosa, probabilmente gli elettroni sono lanciati dentro a essa e si muovono a spirale lungo le linee di forza del suo campo magnetico, irradiando su un vastissimo intervallo di lunghezze d'onda. Oltre a ciò, man mano che il pulsar cede la sua energia alla nebulosa, la sua velocità angolare decresce gradualmente.

Nel 1968 un pulsar fu scoperto al centro della Nebulosa del Granchio e si trovò che esso è realmente la sorgente dell'energia della nebulosa sia nella banda radio sia in quella visibile dello spettro. La stella compie una rotazione su se stessa ogni 0,0331 secondi rallentando regolarmente così da aumentare il periodo di rotazione di $3,5 \times 10^{-8}$ secondi al giorno. La forma dettagliata dello spettro X e l'osservazione di emissione X polarizzata dalla nebulosa, fatta nel 1972 da Robert Novick e dai suoi collaboratori alla Columbia University, confermano la previsione che il processo di sincrotrone sia attivo all'interno della nebulosa. Inoltre, la quantità di energia rotazionale persa dal pulsar eguaglia sostanzialmente la quantità di energia irradiata da tutta la nebulosa, fornendo ulteriore sostegno all'ipotesi che il pulsar sia la fonte dell'energia della Nebulosa del Granchio.

Ciononostante rimangono aperti molti problemi sui particolari dell'interazione del pulsar con la nebulosa. Ad esempio non è affatto chiaro come gli elettroni lascino le immediate vicinanze del pulsar e incomincino a intera-

Mappa a raggi X di Cassiopeia A costruita anch'essa da Borken utilizzando i dati ottenuti coi telescopi per raggi X a incidenza radente del Mullard Space Science Laboratory a bordo di *Copernicus*. Cassiopeia A è un oggetto giovane; la supernova che l'ha generato sarebbe stata osservata attorno al 1700 se la sua luce non fosse stata oscurata da materia interstellare. La struttura marcatamente doppia di Cassiopeia A è una caratteristica tipica di un oggetto così giovane. Il suo diametro angolare è di soli cinque minuti d'arco, solo un trentacinquesimo delle dimensioni angolari dell'Anello del Cigno. Dal momento che i telescopi a raggi X hanno un campo di vista di tre minuti d'arco, la risoluzione angolare della mappa a raggi X è bassa.

Mappa radio di Cassiopeia A ottenuta da Ivan Rosenberg nel 1970 col radiotelescopio di 1,6 chilometri di Cambridge e riprodotta in questa forma da Steven Gull. Essa presenta una risoluzione più fine della mappa a raggi X della pagina accanto. Grazie a ciò i particolari dell'involucro in espansione sono ben evidenti, e i « nodi » dell'emissione radio sono visibili. I « nodi » possono essere nati dai filamenti in cui si è spezzato l'involucro in espansione a causa di un'instabilità tra il gas denso dell'involucro stesso e la materia interstellare, relativamente calda dopo l'urto, che è spazzata via. Si ritiene che anche la mappa a raggi X mostrerebbe probabilmente lo stesso genere di strutture se si potesse ottenere una migliore risoluzione angolare.

gire col campo magnetico più esteso entro la nebulosa. La questione potrebbe essere risolta se si potesse ottenere una mappa della Nebulosa del Granchio nella regione X dello spettro. Tale mappa consentirebbe di determinare la distribuzione degli elettroni energetici nel suo interno. Il diametro angolare della nebulosa osservata dal sistema solare è però molto piccolo: tra 1 e 2 minuti d'arco. (Il diametro apparente della Luna è di 30 minuti d'arco.) Per sapere qualcosa sulla distribuzione degli elettroni sarebbe necessaria pertanto una mappa con una risoluzione di pochi secondi d'arco, cosa estremamente ardua da ottenersi con i telescopi a raggi X attualmente esistenti.

La Nebulosa del Granchio si trova però nella striscia coperta dalla Luna nel suo cammino apparente sulla volta celeste, così che circa una volta ogni 10 anni c'è una « stagione » della durata di parecchi mesi in cui la Luna occulta, ossia eclissa, ripetutamente la nebulosa. Quando il bordo della Luna passa davanti alla nebulosa nasconde (o lascia passare) una parte sempre maggiore dell'emissione X. Si può così valutare l'intensità di tale emissione al variare del tempo. Conoscendo la posizione della Luna e il suo moto si può determinare l'ubicazione e l'estensione della zona che emette i raggi X.

Nel 1974 Frederick D. Seward e i suoi collaboratori al Lawrence Livermore Laboratory dell'Università della California osservarono un'occultazione lunare della Nebulosa del Granchio con un grande rivelatore di raggi X a bordo di un razzo. Essi ottennero dati sulla distribuzione dell'emissione di raggi X dalle varie parti della nebulosa nell'intervallo di energia da 500 a 15 000 elettronvolt. La loro osservazione conferma i risultati che abbiamo ottenuto coi nostri strumenti posti su

La Luna può servire per costruire mappe di sorgenti di raggi X di diametro angolare molto piccolo, purché la sorgente si trovi sulla traiettoria apparente che la Luna descrive vista dalla Terra. La Nebulosa del Granchio soddisfa questo requisito. Essa è occultata, ovvero eclissata, dalla Luna circa una volta ogni 10 anni. L'occultazione dura solo pochi minuti, ma si ripete parecchie volte durante ogni « stagione » di occultazione. Via via che la Luna nasconde (o scopre) la superficie della nebulosa, muovendosi da ovest a est (da destra a sinistra), l'emissione X ricevuta è registrata in funzione del tempo. Queste misure, insieme ai dati sulla posizione e sul moto della Luna, danno informazioni precise sulla distribuzione dei raggi X nella nebulosa.

*Copernicus*: la distribuzione dell'emissione X suggerisce che i raggi X sono prodotti uniformemente e irradiati da una regione sferica interna alla nebulosa. Il centro di tale sfera è però spostato di circa 10 secondi d'arco dalla posizione del pulsar.

Seward e i suoi collaboratori fanno rilevare che, affinché i raggi X siano generati con tale uniformità all'interno di un volume così grande, occorre che gli elettroni che li producono siano accelerati attraverso l'intera regione piuttosto che solo nelle immediate vicinanze del pulsar. Ma, se così fosse, sarebbe necessario riesaminare il meccanismo mediante il quale la stella di neutroni rotante fornisce energia alla nebulosa. Aaron Barnes del Ames Research Center della NASA e Jeffrey D. Scargle del Lick Observatory hanno proposto che il gas ionizzato della Nebulosa del Granchio possa essere considerato come un fluido elettricamente conduttore. La stella di neutroni fornirebbe energia alla nebulosa per mezzo di onde d'urto magnetoidrodinamiche. Quando le onde si propagano attraverso il gas, quasi come increspature nell'acqua, esse sono lentamente smorzate poiché la loro energia è assorbita da protoni ed elettroni ad alta velocità nella nebulosa. Le particelle subiscono un'ulteriore accelerazione e irradiano la loro energia per sincrotrone. In tal modo l'energia è trasferita dalla stella di neutroni alla regione circostante.

L'eventuale importanza delle onde magnetoidrodinamiche è stata inoltre sottolineata da Walter Lewin e dai suoi collaboratori al Massachusetts Institute of Technology. Essi osservarono un'occultazione lunare della Nebulosa del Granchio nell'intervallo di energia tra 20 000 e 150 000 elettronvolt con un contatore a scintillazione trasportato al di sopra della maggior parte dell'atmosfera terrestre da un pallone stratosferico. Il loro apparato registrava raggi X di energia molto più elevata di quanto facessero gli strumenti posti sia sul razzo di Seward sia sul satellite *Copernicus*. Essi osservarono la presenza di parecchie zone che emettono i raggi X di maggiore energia e che tali aree coincidono con molti degli « sbuffi » più luminosi nella banda visibile dello spettro (*si veda l'illustrazione in basso nella pagina a fronte*). È possibile che elettroni emessi dal pulsar siano ulteriormente accelerati negli « sbuffi » per mezzo del meccanismo proposto da Barnes e Scargle e che essi irradino pertanto raggi X più energetici in quelle regioni. Dunque, sebbene rimanga indiscusso il ruolo fondamentale della stella di neutroni centrale come sorgente di energia della Nebulosa del Granchio, le osservazioni X evidenziano la necessità di un'indagine molto più dettagliata del modo con cui l'energia è trasferita.

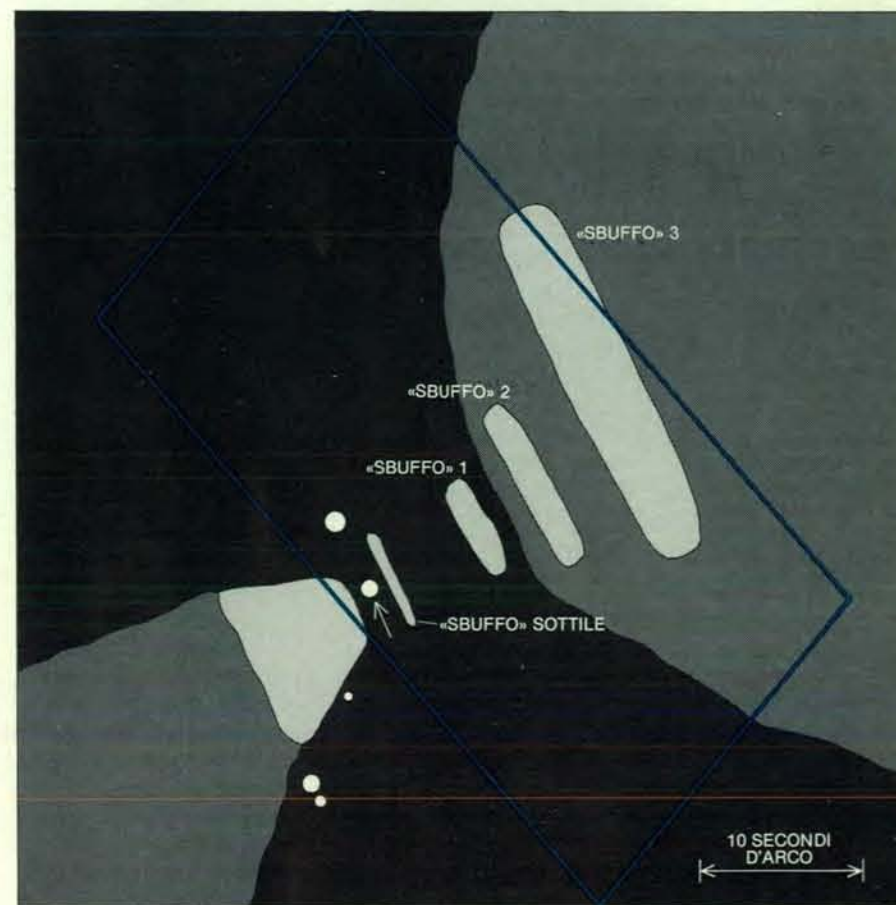


La piccolezza del diametro apparente della Nebulosa del Granchio ha reso difficile la preparazione di una mappa di tale oggetto facendo uso di tecniche diverse dall'occultazione lunare. Ovviamente però, tale metodo è applicabile solo a oggetti che si trovano lungo il percorso della Luna. Sebbene molto poche delle 170 sorgenti di raggi X conosciute siano dislocate così favorevolmente, parecchie di loro hanno un diametro angolare molto maggiore di quello della Nebulosa del Granchio. Pertanto è possibile studiarne la struttura con telescopi per raggi X.

Dal momento che i raggi X passano liberamente attraverso la maggior parte dei materiali, essi non possono essere trattati in un telescopio così come si farebbe con la luce visibile. Tuttavia i raggi X possono essere riflessi se l'angolo che i fotoni incidenti formano con una superficie metallica lucidata e levigata è minore di circa due gradi. Inoltre, se la superficie riflettente è una sezione di paraboloide, essa concentrerà i raggi X in un fuoco, nel quale potrà essere posto il rivelatore. Questo può essere molto piccolo, presentando così il vantaggio di ridurre la sua risposta a particelle cosmiche vaganti che possono essere scambiate per raggi X.

Il sistema di telescopi per raggi X del Mullard Space Science Laboratory montato su *Copernicus* ha tre riflettori, ciascuno dei quali focalizza raggi X appartenenti a diversi intervalli di energia. Il satellite fornisce una piattaforma di grande stabilità che permette il puntamento dei telescopi per raggi X con una precisione migliore di un secondo d'arco. L'apertura del campo di vista di ogni telescopio può essere regolata da terra così da coprire un'area di cielo con un diametro variabile da uno fino a dodici minuti d'arco. Pertanto possono essere tracciate mappe sia di sorgenti compatte di raggi X sia di sorgenti estese.

Tra i resti di supernova che abbiamo studiato coi telescopi a raggi X di *Copernicus* c'è il resto giovane Cassiopeia A. Nel 1940 si scoprì che questo oggetto è un'intensa radiosorgente; in seguito si trovò che esso è anche una sorgente di raggi X. Il suo diametro angolare misura circa cinque minuti d'arco, un sesto del diametro apparente della Luna. Noi abbiamo ottenuto una mappa di tale oggetto limitando il

Il centro dell'emissione X (+) non coincide con la posizione (*freccia*) del pulsar (una stella di neutroni in rapida rotazione) nella Nebulosa del Granchio, come è stato rivelato dalle mappe tracciate col metodo dell'occultazione lunare. Il cerchio racchiude il volume della nebulosa che emette raggi X di energia relativamente bassa: esso ha un diametro di 73 secondi d'arco ed è più piccolo della nebulosa visibile. Il rettangolo delimita una regione che emette raggi X particolarmente « duri » (cioè di energia elevata).

Raggi X energetici sono emessi da « sbuffi » di gas nella Nebulosa del Granchio, come è mostrato in questo ingrandimento del rettangolo tracciato nell'illustrazione in alto. Il centro dell'emissione X è spostato a ovest del pulsar (*freccia*) ed è relativamente vicino a uno degli « sbuffi » di gas (*sbuffo 2*) che è molto luminoso nel visibile. Si è osservato che improvvise variazioni nella frequenza di rotazione del pulsar inducono un'attività ancora più intensa negli « sbuffi ». Evidentemente gli elettroni emessi dal pulsar subiscono un'ulteriore accelerazione negli « sbuffi » e irradiano raggi X per effetto sincrotrone.

| OGGETTO | ETA' (ANNI) | DISTANZA (ANNI LUCE) | DIAMETRO (ANNI LUCE) | DIAMETRO ANGOLARE DELL'EMISSIONE X (MINUTI D'ARCO) | STADIO EVOLUTIVO | LUMINOSITA' IN X TRA 2 keV E 6 keV (NEBULOSA DEL GRANCHIO = 1000) | NOTE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CASSIOPEIA A | 300 | 9100 | 15 | 5 | 1–2 | 60 | — |
| RESTO DELLA NOVA DI TYCHO | 400 | 9800 | 20 | 7 | 1–2 | 10 | NON SONO STATE FATTE MISURE X PER DETERMINARE LA STRUTTURA SPAZIALE DEL RESTO |
| NEBULOSA DEL GRANCHIO | 900 | 6500 | 3 | 2 | 1–2 | 1000 | IL PULSAR NP 0532 SI TROVA NELLA NEBULOSA |
| PUPPIS A | 4000 | 7200 | 55 | 25 | 2 | 8 | — |
| VELA X | 10 000 | 1600 | 130 | 300 | 2–3 | 10 | PROSSIMO AL PULSAR PSR 0833 - 45 |
| ANELLO DEL CIGNO | 20 000 | 2500 | 120 | 170 | 2–3 | — | NON EMETTE RAGGI X DI ENERGIA MAGGIORE DI 1 keV |
| IC 443 | 60 000 | 5000 | 70 | 50 | 2–3 | 5 | PROSSIMO AL PULSAR PSR 0611 + 22 |

Caratteristiche di resti di supernova riassunti e ordinati per età crescente dei resti stessi. Lo stadio evolutivo si riferisce alla fase dell'evoluzione del resto proposta dagli autori e descritta nell'illustrazione della pagina a fronte. La luminosità in X di ciascun resto è espressa in termini dell'energia ricevuta nell'intervallo tra 2 e 6 keV (1 keV = 1000 elettronvolt). La Nebulosa del Granchio irradia un'energia molto superiore a quella emessa dai due resti più giovani; chiaramente tale sorgente, con il suo pulsar centrale emette raggi X con un meccanismo molto diverso da quello con cui irradiano gli altri resti.

campo di vista dei telescopi a tre minuti di arco (*si veda l'illustrazione a pagina 18*). Cassiopeia A è il resto di una supernova che non fu osservata sulla Terra. Probabilmente la luce dell'esplosione della supernova raggiunse la Terra circa nel 1700, non molto dopo la nova di Tycho che è del 1572. Noi non abbiamo tracciato una mappa a raggi X del resto della nova di Tycho, ma tale oggetto e Cassiopeia A presentano una struttura molto simile nella banda radio dello spettro. La struttura di questi due resti giovani differisce però significativamente da quella della Nebulosa del Granchio, soprattutto per l'assenza di una sorgente centrale di elettroni come un pulsar. Calcoli recenti eseguiti da Steven Gull dell'Università di Cambridge suggeriscono che la conformazione di questi resti giovani potrebbe essere stata determinata dal passaggio attraverso il mezzo interstellare dell'onda d'urto prodotta dall'esplosione originaria della supernova. Descriviamo più dettagliatamente il modello.

Dopo l'esplosione di una supernova, il materiale espulso si espande attraverso il mezzo interstellare raccogliendo lungo il suo cammino gas e polvere a bassa densità. L'involucro in espansione accumula così ulteriore materiale e comincia a rallentare. Dopo circa 100 anni la quantità di materiale raccolta dall'involucro è circa uguale a quella espulsa inizialmente e il materiale sul bordo più esterno dell'involucro in espansione decelera considerevolmente. La materia dietro a esso si muove ancora rapidamente attraverso la regione più rarefatta spazzata dal fronte d'onda avanzante. Quando il materiale più veloce raggiungerà l'involucro più denso e penetrerà in esso, subirà un brusco rallentamento riscaldando il gas davanti a sé e formando un secondo fronte d'urto dietro all'involucro denso. Dopo la decelerazione il secondo fronte d'urto sembrerà muoversi verso l'interno rispetto al primo, pertanto è detto onda d'urto « inversa ». Il gas a elevata temperatura dell'involucro denso continua a essere rallentato dalla materia interstellare ancora più calda immediatamente davanti a sé, che è stata appena riscaldata dal fronte dell'onda d'urto. Esso diventa instabile e si spezza in più parti in filamenti. Questo fenomeno potrebbe giustificare i « nodi » che si osservano nella struttura radio di Cassiopeia A (*si veda l'illustrazione a pagina 19*).

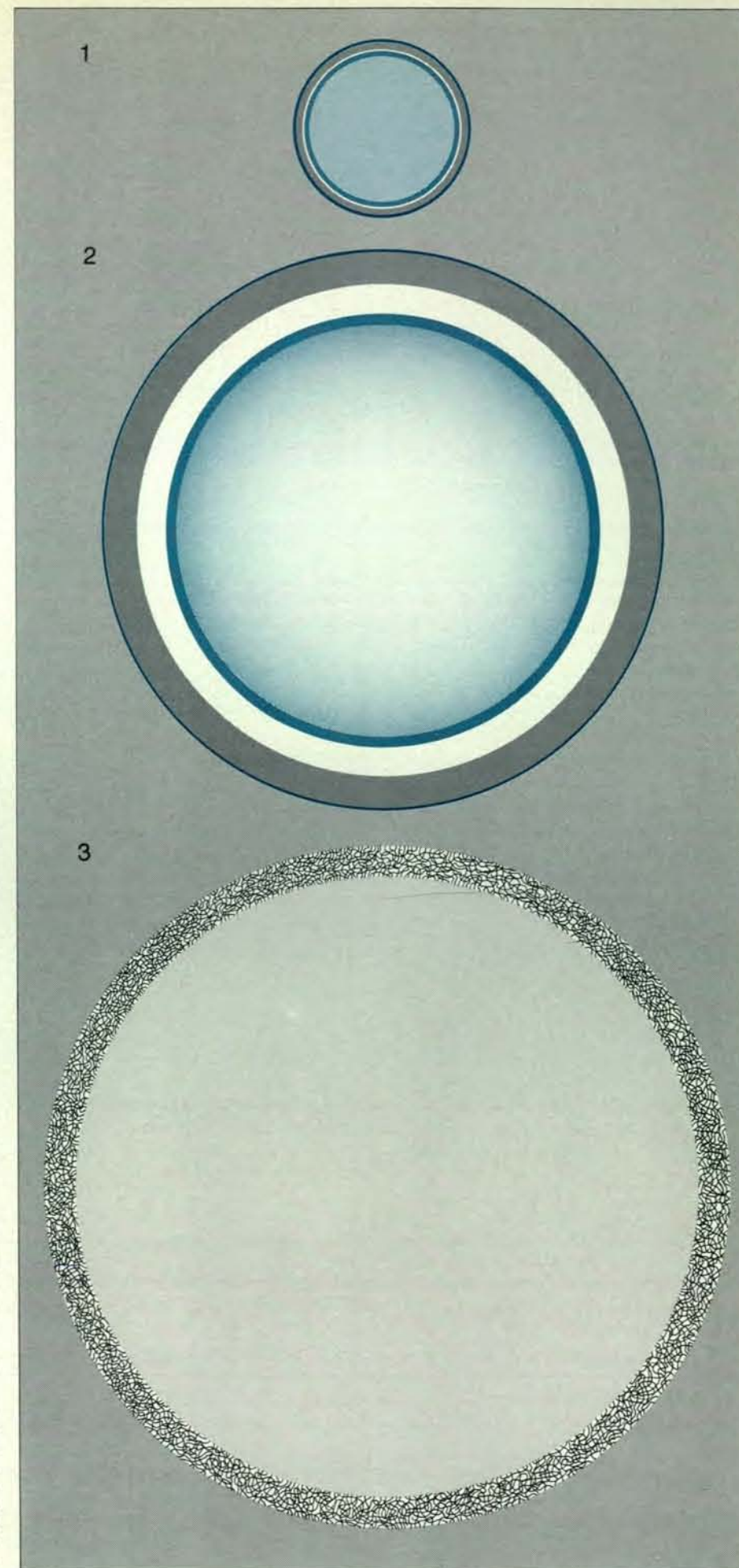
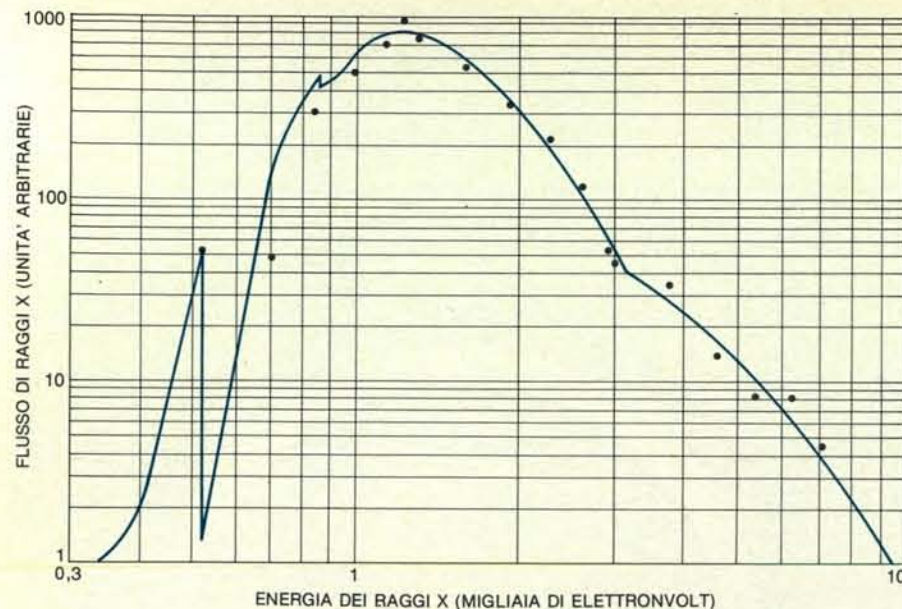
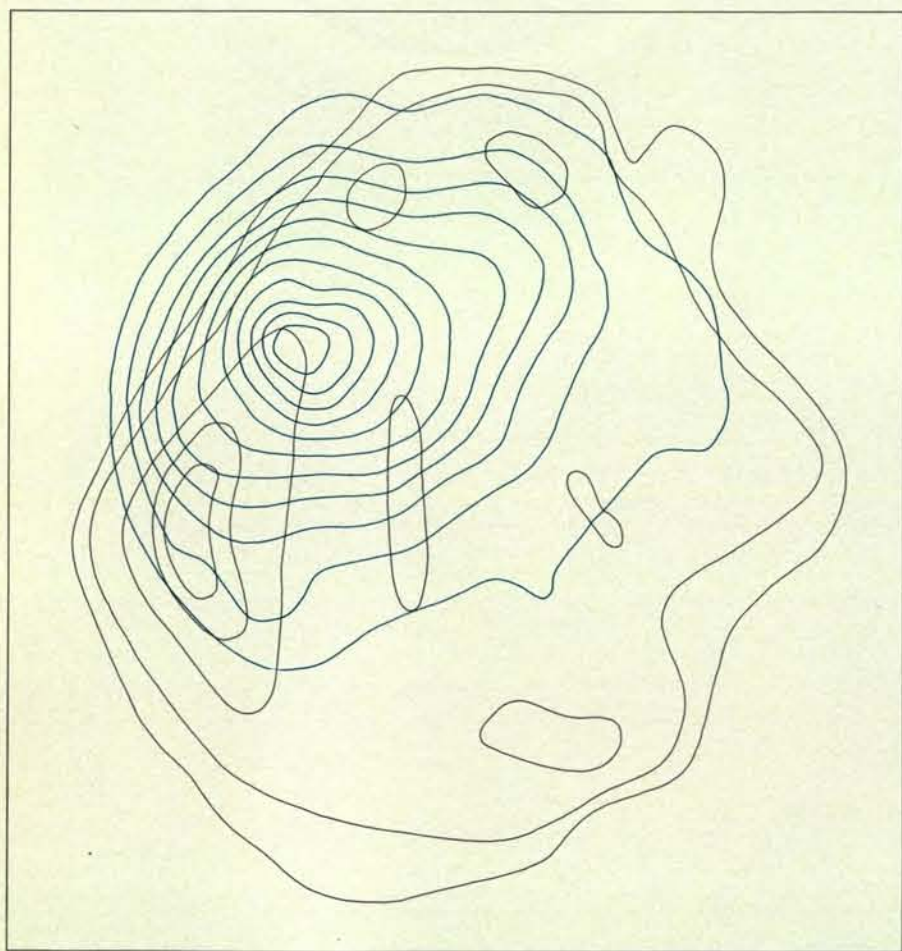
La nostra mappa a raggi X non ha una risoluzione abbastanza fine da mostrare i dettagli delle relazioni tra le conformazioni in X e quelle in radio, né da indicare se vi siano o no strutture nella banda X dello spettro in corrispondenza dei « nodi » osservati a lunghezze d'onda radio. Lo studio particolareggiato dell'aspetto in X di Cassiopeia A dovrà attendere finché siano disponibili telescopi per raggi X con un potere risolutivo dell'ordine di secondi d'arco. Ciononostante, anche il rozzo confronto finora possibile fornisce una prova iniziale che i raggi X sono emessi da gas riscaldato da onde d'urto, e non da elettroni di alta energia che si muovono a spirale in campi magnetici.

Un'indicazione ulteriore a favore della sostanziale correttezza di tale ipotesi è fornita dallo studio degli spettri X di resti come Cassiopeia A e quello della nova di Tycho. Anche se i contatori proporzionali posti nel fuoco dei telescopi a raggi X di *Copernicus* non possiedono un potere di risoluzione sufficiente per separare singole righe di emissione, è altresì possibile confrontare grossolanamente i dati raccolti su Cassiopeia A sia con gli spettri previsti nel caso di emissione da gas a elevata temperatura, sia nel caso di radiazione di sincrotrone. Tale confronto suggerisce che i raggi X siano emessi non per il processo di sincrotrone, ma da due volumi di gas caldo a temperature differenti (*si veda la illustrazione in alto a pagina 24*). Inoltre, Alan N. Bunner dell'Università del Wisconsin e i suoi collaboratori hanno combinato dati X ad alta energia del satellite *Uhuru* con misure di raggi X meno energetici ottenute con un rivelatore posto a bordo di un razzo sonda; le osservazioni da loro condotte sul resto della nova di Tycho segnalano la presenza di gas a diverse temperature.

Una prova conclusiva della presenza di gas ad alta temperatura potrebbe essere fornita da uno strumento, come uno spettrometro di Bragg a cristallo, capace di risolvere singole righe di emissione nello spettro X. La densità del gas in un resto di supernova è sufficientemente bassa da permettere che le righe di emissione caratteristiche di un gas a elevata temperatura sfuggano dalla regione che le emette senza essere assorbite dal gas più freddo circostante. Pochi esperimenti di tal genere sono stati finora tentati, ma l'efficienza dei cristalli nel diffrangere i raggi X in uno spettro è bassa e nessun risultato positivo è stato fin qui ottenuto. Gli sforzi lungo queste linee di ricerca continuano, e poiché sembra probabile, in base ai dati oggi esistenti, che i raggi X siano emessi da gas caldo, si dovrebbe riuscire probabilmente a osservare le righe di emissione anche in resti più giovani della Nebulosa del Granchio.

Verso la fine dell'evoluzione di un resto di supernova la massa di gas accumulata passando attraverso il mezzo interstellare e riscaldata dal fronte d'urto in espansione è molto maggiore della massa di gas espulsa dall'esplosione iniziale. A questo punto la temperatura della materia dietro la prima onda d'urto si è ridotta a meno di 10 milioni di kelvin. A una tale temperatura è praticamente certo che i raggi X sono emessi dal gas interstellare caldo e non dal processo di sincrotrone. Alcuni elettroni sono ancora intrappolati nel campo magnetico interstellare che è stato compresso dall'onda d'urto. Sebbene gli elettroni non possano produrre raggi X per mezzo del processo di sincrotrone, essi possono ancora irradiare, per mezzo di quel meccanismo, a energie più basse nella banda radio dello spettro.

Già da qualche tempo i resti di supernova più antichi sono stati riconosciuti come radiosorgenti estese, ma è stato in gran parte per il lavoro di Seward e dei suoi collaboratori che fu osservata per la prima volta un'emissione X estesa da tali oggetti. Alcuni tra i vecchi resti di supernova vicini, come l'Anello del Cigno, presentano

L'evoluzione di un resto di supernova è descritto in tre fasi. Dieci anni dopo l'esplosione iniziale (*1*) l'onda d'urto (*linea continua esterna in colore*) è ancora in espansione libera attraverso il mezzo interstellare (*in grigio chiaro*) con una velocità di cira 15 000 chilometri al secondo. A questo punto la quantità di materia interstellare raccolta dall'involucro (*in grigio scuro*) è trascurabile rispetto alla quantità di gas espulso; così il materiale espulso forma solo un involucro sottile (*in colore chiaro*) subito dietro l'onda d'urto iniziale. Dopo circa 100 anni (*2*) la quantità di materia raccolta è paragonabile a quella espulsa inizialmente e il materiale ha rallentato l'onda d'urto fino a una velocità di circa 8000 chilometri al secondo. Materia emessa ad alta velocità raggiunge l'involucro e dà luogo a un'onda d'urto « inversa » (*linea in colore intenso*) che è separata da quella iniziale. Da 10 000 a 20 000 anni più tardi (*3*) l'involucro in espansione della nebulosa ha perso molta energia per irradiazione da materia ad alta temperatura ed è rallentata a una velocità di 500 chilometri al secondo. La temperatura dell'onda d'urto originaria si è ridotta a meno di cinque milioni di kelvin e il gas emette essenzialmente raggi X « molli ». A questo punto il resto può avere dimensioni di 100 anni luce e l'involucro esterno si è spezzato in filamenti.

**La linea continua mostra lo spettro X di Cassiopeia A supponendo che il resto sia costituito da gas caldo a due temperature diverse (8 milioni e 30 milioni di kelvin). I punti indicano le osservazioni dello spettro effettivo ottenute da *Copernicus*. Il gas più caldo si trova nell'onda d'urto iniziale, quello più freddo nell'onda d'urto « inversa ». Il minimo a sinistra è dovuto all'assorbimento da parte dell'ossigeno interstellare.**

**Le mappe X e radio di Puppis A sono sovrapposte per mostrare come le strutture brillanti di bande differenti dello spettro non coincidono. La regione che emette raggi X (*profili in colore*) è più piccola di quella che emette onde radio (*profili in nero*) e può rappresentare l'incontro tra l'onda d'urto originaria e una densa nube interstellare.**

un diametro di parecchi gradi; lo studio di questi oggetti facendo uso di un rivelatore con campo di vista piccolo come quello dei telescopi per raggi X posti su *Copernicus* richiederebbe un tempo di osservazione troppo lungo. Una mappa a raggi X dell'Anello del Cigno è stata tracciata da Saul A. Rappaport e dai suoi collaboratori del Massachusetts Institute of Technology. Essi l'hanno diligentemente costruita utilizzando una serie di osservazioni a scansione della nebulosa eseguite per mezzo di un rivelatore a grande area con un campo di vista di un decimo di grado posto a bordo di un razzo.

Durante i 20 000 anni trascorsi dalla sua formazione, l'Anello del Cigno si è dilatato fino a un diametro di 100 anni luce. Il gas dietro al primo fronte di urto si è raffreddato fino a una temperatura compresa tra due e tre milioni di kelvin. Nessuna traccia della materia espulsa nell'esplosione è rimasta. Pertanto la conformazione irregolare della regione che emette i raggi X rispecchia l'esistenza di disuniformità nel gas interstellare. Se la densità del mezzo interstellare fosse uniforme, allora non ci sarebbe emissione X rivelabile prodotta dall'onda d'urto in espansione dell'Anello del Cigno. Infatti la velocità dell'onda d'urto, così come è misurata dalle osservazioni spettroscopiche dei filamenti visibili, sembra essere troppo bassa per riscaldare un gas fino a una temperatura sufficientemente elevata da produrre raggi X.

D'altra parte è ben noto che il mezzo tra le stelle della nostra galassia è caratterizzato dalla presenza di nubi di gas e di polvere. Quando l'onda d'urto in espansione da una supernova raggiunge una di tali nubi, incontra un gradiente nella densità del gas. Lavorando con una mappa a raggi X dell'Anello del Cigno simile a quella ottenuta dal gruppo del Massachusetts Institute of Technology, Gordon P. Garmire e i suoi colleghi del California Institute of Technology hanno dimostrato che un involucro caldo e sottile di gas può essere formato quando un'onda d'urto che si propaga a una velocità relativamente bassa incontra una nube di densità elevata. Sulla base dei calcoli di Garmire si può concludere che le aree luminose in X sulla mappa corrispondono a zone di alta densità nel gas costituente il mezzo interstellare. Invece nelle zone dove la densità del gas è bassa e uniforme l'emissione X è debole o inesistente.

Si può trovare un altro possibile esempio di interazione tra un'onda d'urto da una supernova e una nube interstellare confrontando le mappe in X e in radio del resto di supernova Puppis A (*si veda l'illustrazione in basso nella pagina a fronte*). È chiaro che le strutture luminose in X non coincidono con quelle attive in radio. L'intensa emissione X può essere comparsa quando l'onda d'urto in espansione ha incontrato una nube interstellare. Il bordo della regione che emette raggi X e il limite dell'onda d'urto appaiono comunque separati nelle regioni in cui la temperatura del gas non è abbastanza elevata per produrre raggi X.

Ancora un esempio di distribuzione non uniforme di emissione X può essere visto nel vecchio resto IC 443. Un confronto tra le osservazioni di *Copernicus* e quelle del settimo Osservatorio solare orbitante (OSO-7) indica che praticamente tutta l'emissione X proviene da un intenso « nodo » di filamenti. Altre osservazioni suggeriscono che una densa nube interstellare si trova in quella parte del resto. Pertanto la localizzazione dell'emissione X indica che essa risulta dall'interazione tra l'onda d'urto della supernova e il gas della nube. Segue da ciò che facendo mappe a raggi X di vecchi resti di supernova possiamo studiare la distribuzione delle densità delle nubi interstellari. Inoltre, analizzando nei suoi dettagli lo spettro X del resto di supernova dovremmo riuscire a ottenere informazioni dirette sull'abbondanza degli elementi presenti nel mezzo interstellare.

In solo pochi anni le osservazioni dell'emissione X da resti di supernova hanno trasformato le nostre idee su tali oggetti. Sebbene il pulsar nella Nebulosa del Granchio rimanga indiscutibilmente la fonte di energia dell'intero oggetto, le mappe a raggi X indicano chiaramente che gli elettroni sono nuovamente accelerati all'interno della nebulosa, lontano dal pulsar. Inoltre, resti giovani come Cassiopeia A e il resto della nova di Tycho sembrano contenere grandi quantità di gas a elevata temperatura che emette raggi X, contraddicendo l'ipotesi primitiva che i raggi X fossero irradiati per sincrotrone. Ulteriori studi di questi oggetti giovani ci permetteranno di valutare l'esatta natura dell'interazione tra il materiale espulso nell'esplosione originaria e il gas interstellare circostante. Infine, le mappe a raggi X dei resti antichi incominciano a darci numerose informazioni sulla struttura del mezzo interstellare a distanze considerevoli dalla posizione della supernova originaria.

# La freccia del tempo

*Perché il tempo scorre in un'unica direzione? La risposta non va cercata nelle leggi di natura, che ben difficilmente riescono a distinguere tra passato e futuro, ma nelle condizioni prevalenti all'origine dell'universo*

di David Layzer

Sembra facile distinguere il passato dal futuro, dato che la memoria ci fornisce una registrazione del passato, mentre del futuro non abbiamo una conoscenza certa. Tuttavia nell'interpretazione degli eventi secondo le leggi fondamentali della fisica la distinzione tra passato e futuro quasi scompare. La nostra percezione intuitiva del mondo ce lo rappresenta come qualcosa di esteso nello spazio ma « in sviluppo » nel tempo. Considerato in scala atomica il mondo è un continuo quadridimensionale esteso nello spazio e nel tempo. Intuitivamente diamo un significato particolare a un momento specifico, il presente, che vediamo come la cresta di un'onda che trasforma continuamente la potenza in atto e lascia nella sua scia il morto passato. La microfisica non privilegia nessun momento del tempo e fa solo una leggera differenza tra la direzione del passato e quella del futuro.

La nostra percezione intuitiva del mondo come qualcosa che si sviluppa nel tempo non può però essere abbandonata come qualcosa di meramente soggettivo, dato che ha una controparte oggettiva in una serie di processi biologici, geologici e astronomici. Aspetti evidenti sono i processi fisiologici che sono alla base della memoria, della crescita, dello sviluppo e della differenziazione degli organismi viventi, processi evolutivi, dove variazioni casuali associate alla selezione naturale hanno prodotto un numero enorme e in crescita costante di forme viventi organizzate in modo sempre più complesso. La crosta terrestre reca i segni di mutamenti evolutivi durati 4 miliardi e mezzo di anni, e le superfici piene di crateri della Luna e di Marte testimoniano il passaggio di un analogo periodo di tempo. Le stelle normali, le giganti rosse, le supernove e le nane bianche rappresentano stadi diversi nel ciclo evolutivo della vita di una singola stella. Infine la recessione delle galassie più lontane suggerisce l'idea che l'intero universo sia il prodotto di un processo evolutivo, che abbia avuto origine, in un tempo finitamente lontano, da uno stato indifferenziato estremamente denso.

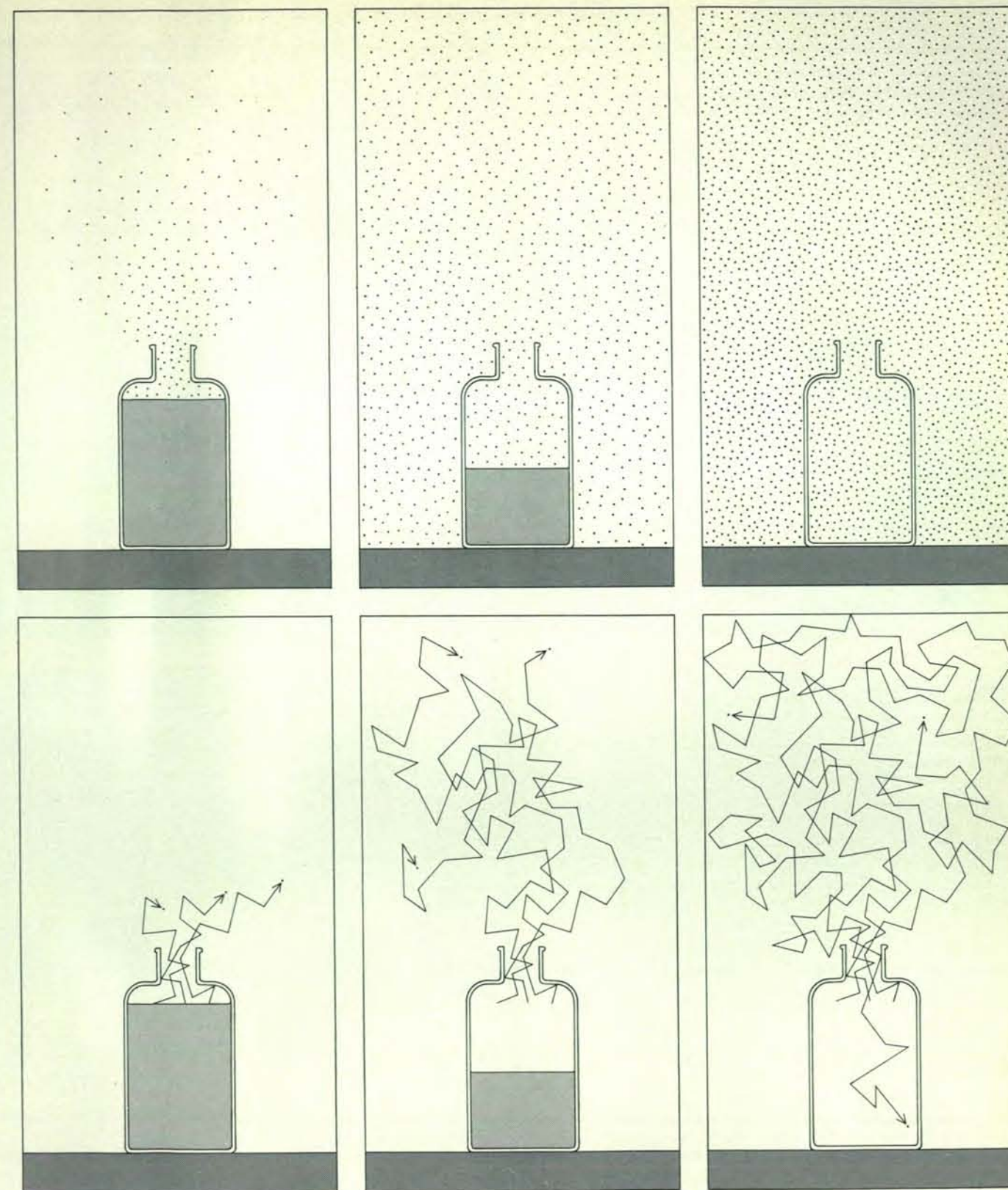
Tutti questi processi hanno qualcosa in comune: generano ordine, ossia informazione, trasformano uno stato più semplice in uno più complesso. Per usare un'espressione di Sir Arthur Eddington, indicano in che direzione è orientata la « freccia del tempo », definiscono quella che chiamo la freccia « storica » del tempo.

Paradossalmente è possibile definire la direzione del tempo per mezzo di una classe diametralmente opposta di processi, quelli che distruggono l'informazione e che generano disordine. Se lascio cadere una zolletta di zucchero in una tazza di tè caldo e mescolo, la concentrazione spaziale delle molecole di zucchero, il movimento del tè e la differenza di temperatura tra il tè e ciò che lo circonda costituiscono l'informazione macroscopica, ossia l'ordine. Col dissolversi dello zucchero, il raffreddarsi del tè e il cessare dei suoi movimenti l'informazione svanisce gradualmente. I processi irreversibili che distruggono l'informazione macroscopica (nel nostro esempio la diffusione molecolare, la viscosità e la conduzione del calore) sono manifestazioni della seconda legge della termodinamica. Tale legge stabilisce che tutti i processi naturali generano entropia, essendo l'entropia una misura del disordine. La distruzione irreversibile dell'ordine macroscopico definisce quella che ho chiamato freccia « termodinamica » del tempo.

A livello microscopico non si osserva né la freccia storica né quella termodinamica. Il movimento di una singola molecola di zucchero o di tè non genera né informazione né entropia. Il concetto di « ordine » è di tipo macroscopico, è una proprietà dei sistemi costituiti da molte particelle che non ha alcun senso quando sia applicata a singoli atomi o molecole. Nella fisica delle particelle elementari il mondo cambia senza evolversi.

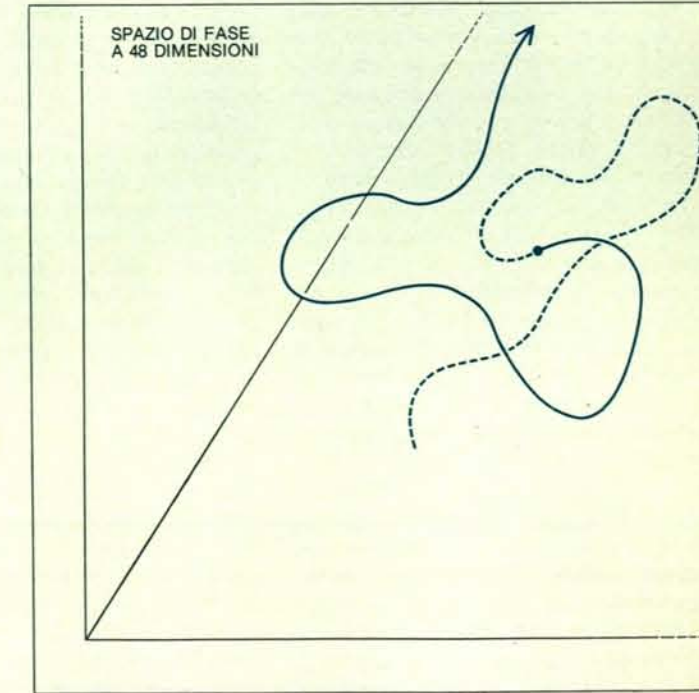
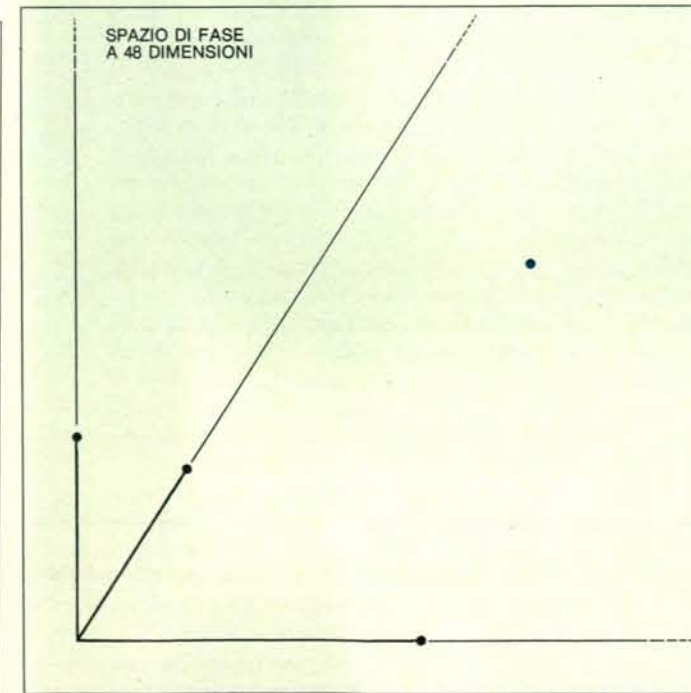
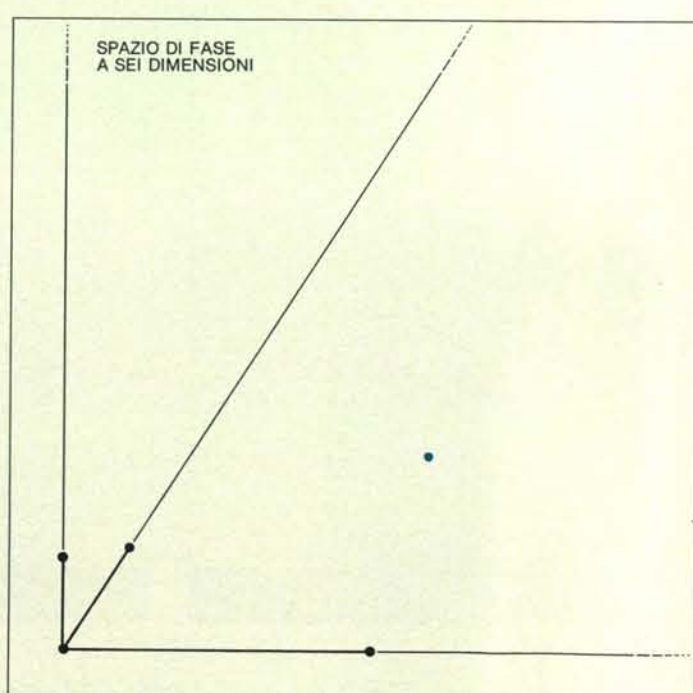
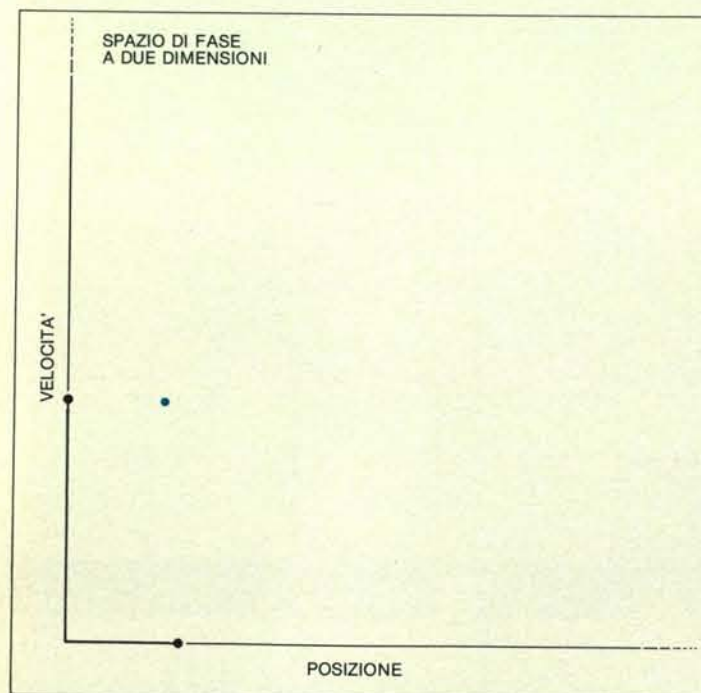
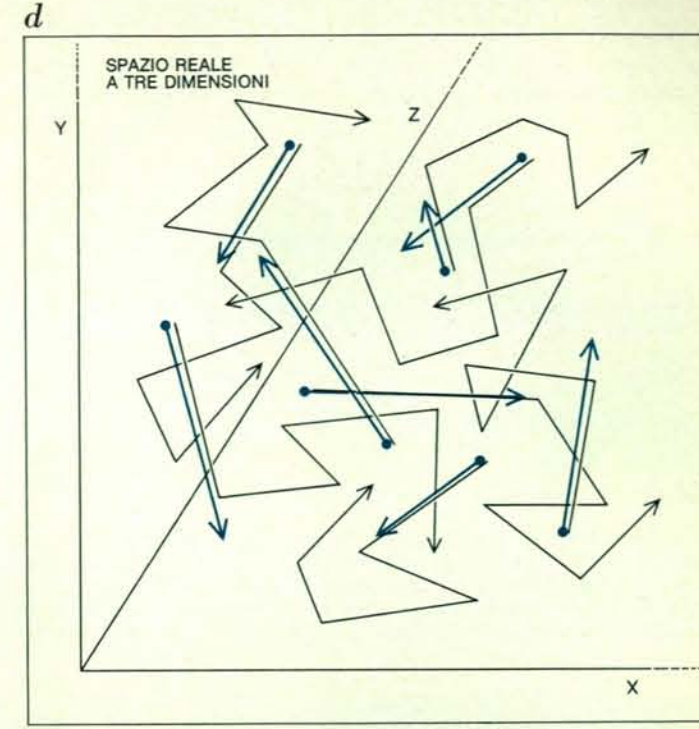
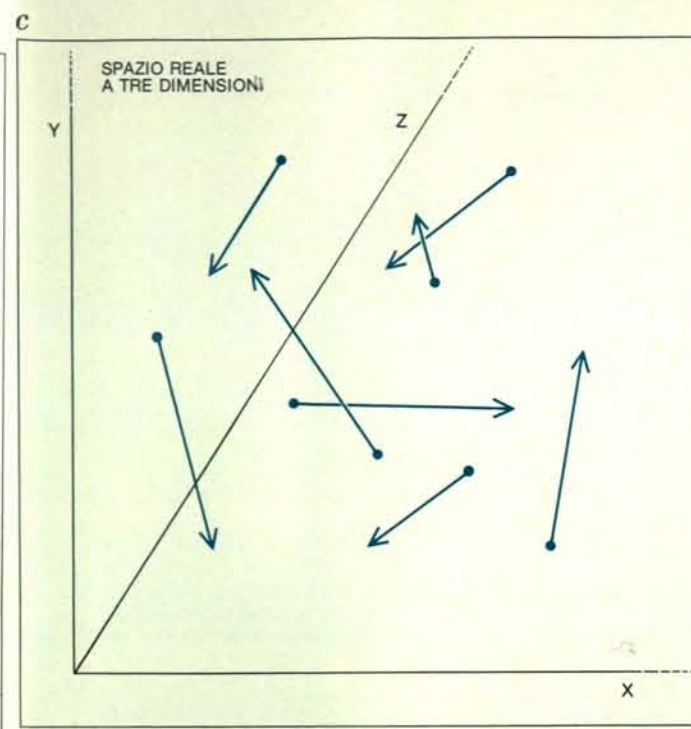
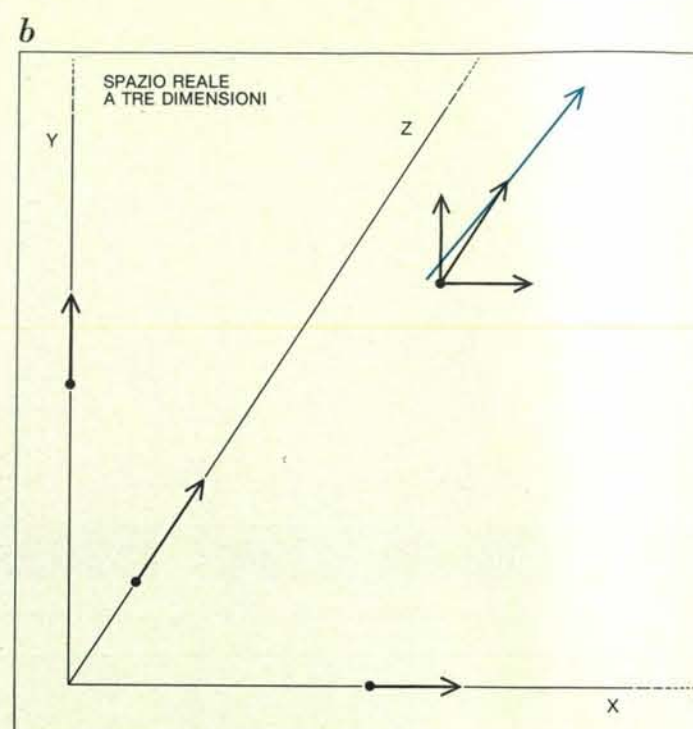
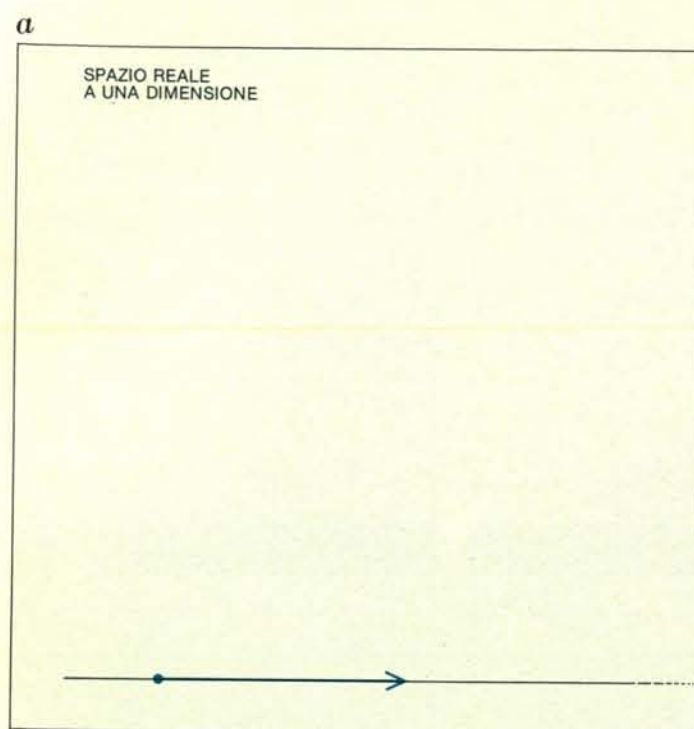
Io sostengo che né la concezione macroscopica del mondo come un sistema che degenera verso un disordine completo, né quella microscopica di un sistema di campi e particelle interagenti che muta senza evolversi, sono richieste dalle leggi fondamentali della fisica. La mia proposta consiste nel considerare entrambi i punti di vista come derivati da assunzioni ausiliarie circa la natura e l'origine dell'universo, e quindi nel sostituire tali assunzioni con altre, a mio parere più semplici, ugualmente in accordo con l'osservazione empirica. Il modello di universo che si ricava, sebbene differisca da quello accettato dalla maggior parte dei fisici, risolve l'apparente contraddizione tra freccia storica e termodinamica del tempo, riconciliandole entrambe con il carattere quasi simmetrico rispetto al tempo delle leggi fisiche a livello microscopico. Questa teoria implica che il mondo sia in espansione nel tempo e contemporaneamente spiega come diventi a ogni istante più complesso e ricco d'informazione.

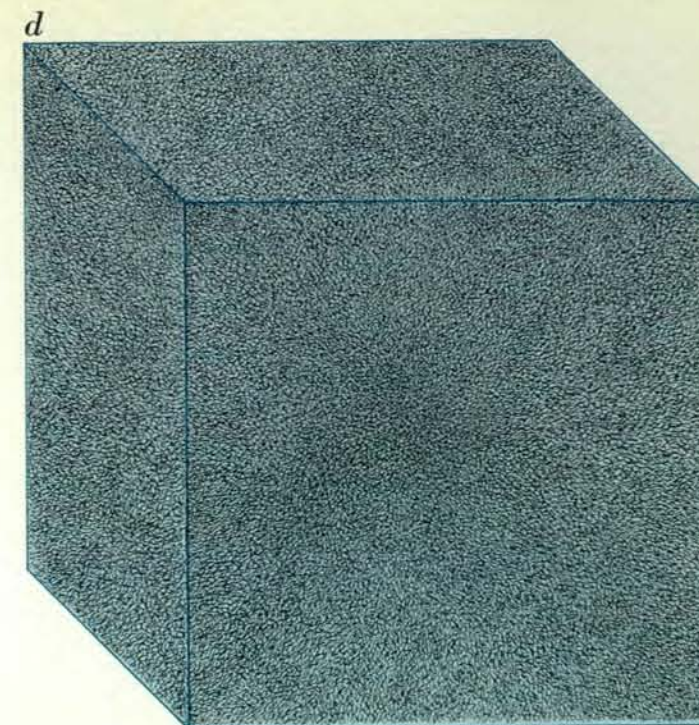
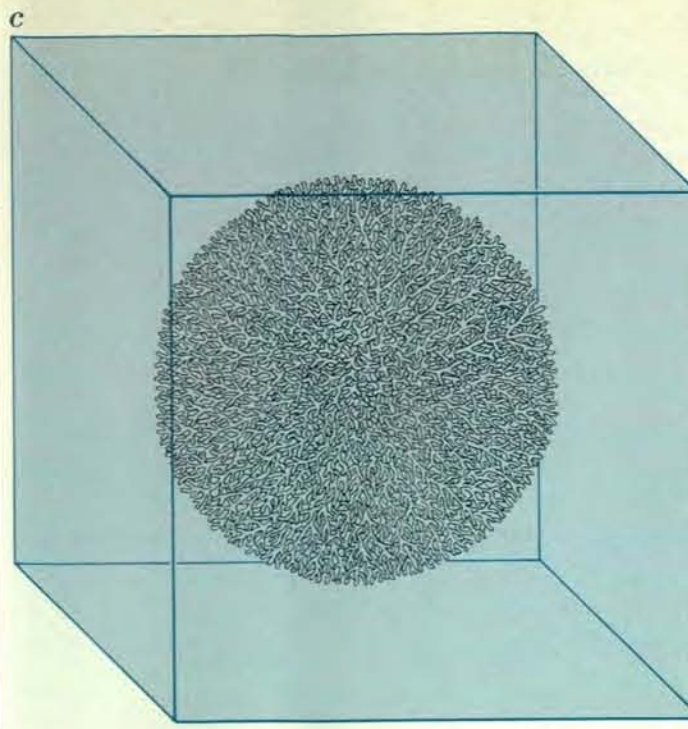
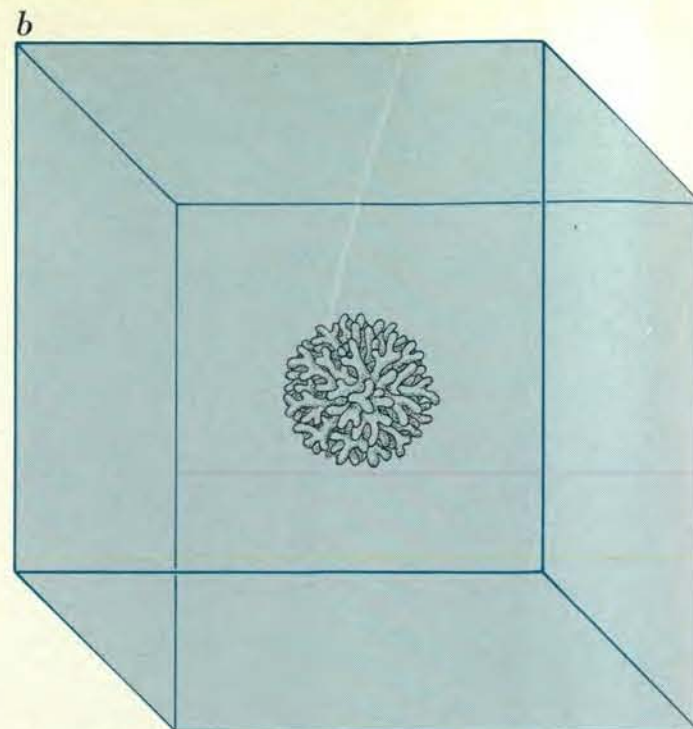
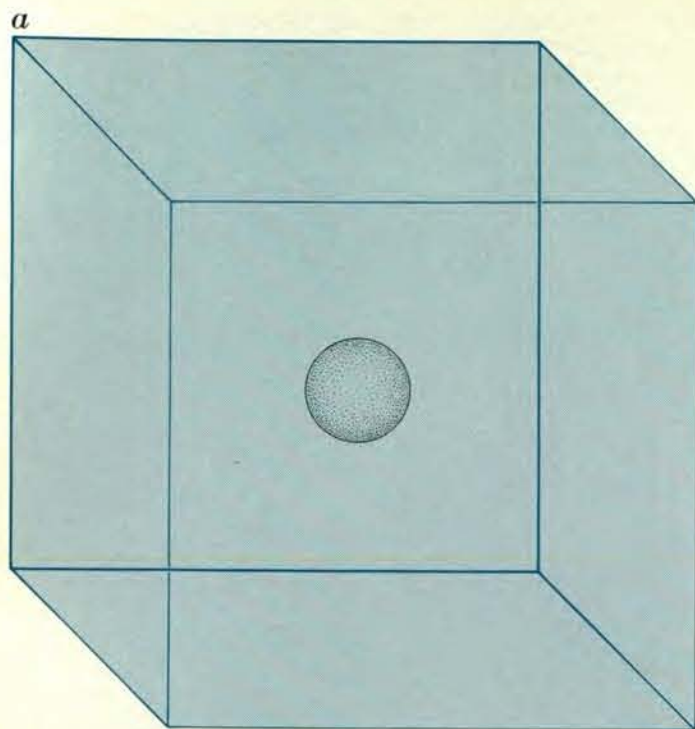
## *L'irreversibilità*

La freccia storica e quella termodinamica derivano entrambe da processi che si svolgono sempre nella medesima direzione, il cui accadere è irreversibile. Che cosa rende irreversibili questi processi? Tutti i fenomeni possono essere descritti in ultima analisi come effetto dell'interazione di particelle elementari. Se le leggi che governano queste interazioni non distinguono tra passato e

Un esperimento mentale basato sulla diffusione del profumo permette di formulare conclusioni in apparenza paradossali: il processo nel suo complesso si sviluppa sempre nella medesima direzione, ma è costituito da eventi microscopici che presi singolarmente sono completamente reversibili. In una stanza ipotetica perfettamente isolata si apre una bottiglia di profumo. I disegni in alto, osservati da sinistra a destra, mostrano le molecole che si distaccano dalla superficie del liquido e che piano piano riempiono la stanza, fino all'evaporazione completa del liquido. Letti nel senso opposto i disegni rappresentano un processo mai osservato in natura: tutte le molecole entrano spontaneamente nella bottiglia e si condensano. Nei disegni in basso lo stesso processo è visto a livello microscopico. Le singole molecole lasciano la superficie del liquido e seguono complicate traiettorie a zig-zag diffondendosi nella stanza. Questa successione di eventi potrebbe benissimo svolgersi nell'altro senso, dato che, se ogni molecola invertisse la propria direzione, ripercorrendo la medesima strada, le molecole tornerebbero tutte nella bottiglia. In questo modo la molecola obbedirebbe a tutte le leggi della fisica e quindi sarebbe impossibile, esaminando il percorso di una singola molecola, capire se stiamo assistendo al processo normale oppure a quello che si svolge alla rovescia.

futuro, qual è il motivo dell'irreversibilità che osserviamo nel mondo macroscopico?

Una possibile spiegazione potrebbe trovarsi nel fatto che anche le leggi della microfisica non sono perfettamente simmetriche rispetto al tempo. L'esistenza di un'asimmetria temporale a livello di particelle subatomiche può essere confermata dal processo di decadimento di un mesone *K* neutro. Uno dei diversi possibili processi di decadimento di tale particella sembra violare alcune simmetrie della natura, e l'usuale interpretazione di questo fatto è che la simmetria violata sia quella dell'irreversibilità del tempo (si veda l'articolo *Esperimenti sull'inversione del tempo* di O. E. Overseth in « Le Scienze », n. 17, gennaio 1970). Tuttavia questa violazione è molto debole, dato che la si osserva in meno dell'uno per cento dei casi. Inoltre i mesoni *K* sono presenti solo in esperimenti di fisica delle alte energie; non sono ordinari costituenti della materia e non giocano alcun ruolo nei processi macroscopici che definiscono la freccia storica e quella termodinamica.

Se le radici dell'irreversibilità non si trovano nelle leggi che governano gli eventi microscopici, significa che andranno cercate nei vincoli che condizionano il verificarsi di tali eventi. Leggi e vincoli sono aspetti complementari della descrizione fisica della natura. Le leggi descrivono le regolarità sottostan-

Il concetto di spazio di fase è utilizzato per rappresentare lo stato dinamico di un sistema di particelle. Ogni particella è descritta da un vettore (*frecce colorate*) che definisce la posizione e la velocità. Per una particella in un universo unidimensionale (*a*) sono sufficienti due numeri per specificare questi parametri e lo stato della particella può essere rappresentato in uno spazio di fase a due dimensioni. Ogni possibile stato della particella corrisponde a qualche punto nello spazio di fase. Una particella libera di muoversi in uno spazio a tre dimensioni (*b*) richiede sei numeri per la specificazio-

ne del suo stato dato che sia la posizione sia la velocità hanno componenti su tre assi. Lo spazio di fase corrispondente deve perciò avere sei dimensioni. Dato che non è possibile costruire uno spazio reale con più di tre dimensioni, lo spazio di fase è qui rappresentato con una « fetta » tridimensionale dello spazio a sei dimensioni. In un sistema composto da molte particelle occorrono sei numeri per specificare lo stato di ogni particella, cosicché lo spazio di fase corrispondente deve avere un numero di dimensioni uguale a quello delle particelle moltiplicato per sei. Per esempio, un sistema di otto particelle (*c*) potrebbe essere rappresentato da un punto in uno spazio di fase a 48 dimensioni. L'informazione necessaria per specificare lo stato è condensata tutta nella collocazione di questo singolo punto e ogni stato possibile corrisponde a un unico punto nello spazio di fase a 48 dimensioni. Gli assi della fetta tridimensionale sono scelti in modo arbitrario tra i 48. Con l'evolversi del sistema di particelle (*d*) il suo stato dinamico cambia e questo mutamento si riflette nel movimento del punto che lo rappresenta nello spazio di fase. Il percorso del punto, sia nel passato sia nel futuro, è completamente determinato dalla sua posizione iniziale e quindi la storia dinamica del sistema può essere completamente predetta nei dettagli. Inoltre il punto nello spazio di fase può seguire lo stesso percorso in entrambe le direzioni e ciò rappresenta la completa reversibilità dei movimenti delle particelle nello spazio reale. Anche in questo caso nella nostra rappresentazione abbiamo scelto tre dimensioni qualsiasi tra le 48 a nostra disposizione.

**La rappresentazione probabilistica di un sistema composto da molte particelle raffigura in modo più realistico il comportamento del sistema. La probabilità è mostrata come un fluido nello spazio di fase; la massa del fluido in una regione rappresenta la probabilità che il punto che rappresenta lo stato del sistema si trovi in quella regione. Nell'esperimento sulla diffusione del profumo tutto il fluido probabilistico è concentrato all'inizio in un piccolo volume, dato che tutte le molecole sono racchiuse nella bottiglia. La forma del fluido è di fatto un'ipersfera a 6*n* dimensioni, dove *n* è il numero delle molecole di profumo; nel disegno è rappresentata da una sfera a tre dimensioni (*a*). Con l'evolversi del sistema il fluido deve migrare in regioni dello spazio di fase più lontane, ma dato che le traiettorie delle particelle sono determinate il fluido risulta incomprimibile. La sua espansione non è come quella di un gas, ma assomiglia all'estroflessione di « tentacoli » (*b*), sempre più sottili e numerosi (*c*) col crescere degli stati possibili del sistema. Alla fine tutto l'ipervolume è pieno di sottili rami del fluido, il cui volume totale rimane costante. Da un punto di vista macroscopico la distribuzione del fluido sembra ora uniforme, ma non è così a un esame ravvicinato (*d*).**

ti i fenomeni, sono poco numerose e si applicano a un dominio molto vasto. I vincoli servono per selezionare, nell'ambito degli eventi governati da una legge, il particolare fenomeno che interessa. Le leggi definiscono l'ambito del possibile, i vincoli ciò che è reale o rilevante. I vincoli possono prendere la forma di condizioni iniziali, condizioni limitanti o condizioni di simmetria.

Per illustrare come leggi e vincoli contribuiscano insieme a dar forma ai fenomeni, consideriamo i movimenti dei pianeti del sistema solare. In base alla legge di gravitazione di Newton si potrebbero calcolare tutte le posizioni passate e future dei pianeti conoscendo le loro posizioni e velocità in un dato momento. La legge di Newton spiega perché ogni pianeta segua un'orbita ellittica con il Sole in uno dei fuochi, perché il movimento di una linea che connetta il Sole con un pianeta generi aree uguali in tempi uguali e perché i quadrati dei periodi orbitali dei pianeti siano proporzionali ai cubi dei diametri delle loro orbite. La legge in questione potrebbe spiegare questi fatti per ogni sistema planetario. D'altra parte la legge di gravitazione non spiega perché le orbite dei pianeti sono quasi circolari, perché i piani orbitali sono quasi coincidenti o perché tutti i pianeti girano intorno al Sole nella stessa direzione. Secondo quanto riconobbe lo stesso Newton, tali regolarità devono avere origine dalle condizioni iniziali.

Per spiegare queste regolarità occorrerebbe una teoria della formazione dei pianeti. Tale teoria non potrebbe fornire in dettaglio le condizioni iniziali del sistema solare, ma potrebbe specificare certe proprietà statistiche dei sistemi primordiali da cui hanno avuto origine i sistemi planetari come il nostro. Anche questa teoria dovrebbe muovere però da certe condizioni iniziali particolari, che a loro volta potrebbero mostrare certe regolarità statistiche che spingerebbero la spiegazione teorica a un livello più profondo. In questo modo saremmo condotti a formulare una serie di problemi cosmogonici sempre più generali le cui soluzioni darebbero origine a spiegazioni sempre più generali delle regolarità statistiche dell'universo astronomico. Questa ipotetica catena di teorie cosmogoniche deve terminare alla fine nella specificazione di un insieme di vincoli riguardanti l'universo nel suo complesso, comprese certe condizioni iniziali. È proprio in questo insieme di condizioni vincolanti che possiamo trovare la radice dell'irreversibilità.

*Informazione ed entropia*

I processi che definiscono la freccia storica e la freccia termodinamica del tempo sono quelli che rispettivamente generano informazione e entropia. Come dimostrò nel 1946 Claude E. Shannon del Massachusetts Institute of Technology, l'informazione è una proprietà delle descrizioni statistiche dei sistemi fisici. Essa viene misurata in bit, o cifre binarie, dove per bit si intende la quantità d'informazione necessaria per decidere tra due possibilità egualmente probabili. L'informazione può anche essere considerata come una proprietà dei sistemi fisici stessi, una misura del loro livello di organizzazione. Un teorema fondamentale dovuto a Shannon dimostra che il contenuto d'informazione di un sistema è pari al minimo numero di bit necessario per codificare una descrizione statistica completa del sistema.

Il concetto di entropia è strettamente connesso a quello di informazione. La entropia è stata definita per la prima volta (da Rudolf Clausius e da Lord Kelvin) nel contesto della termodinamica e consiste nella misura dello spostamento di un sistema dall'equilibrio termodinamico; nello stato di equilibrio l'entropia assume il valore massimo per dati valori di temperatura e di densità.

Utilizzando una formula derivata per la prima volta da Ludwig Boltzmann e da J. Willard Gibbs, Shannon definì un concetto di entropia all'interno della teoria dell'informazione, consistente nella misura del grado di incertezza associato alla descrizione statistica di un sistema. L'entropia termodinamica di Kelvin e Clausius e quella statistica di Boltzmann, Gibbs e Shannon godono di identiche proprietà matematiche: sono aspetti differenti di un medesimo concetto.

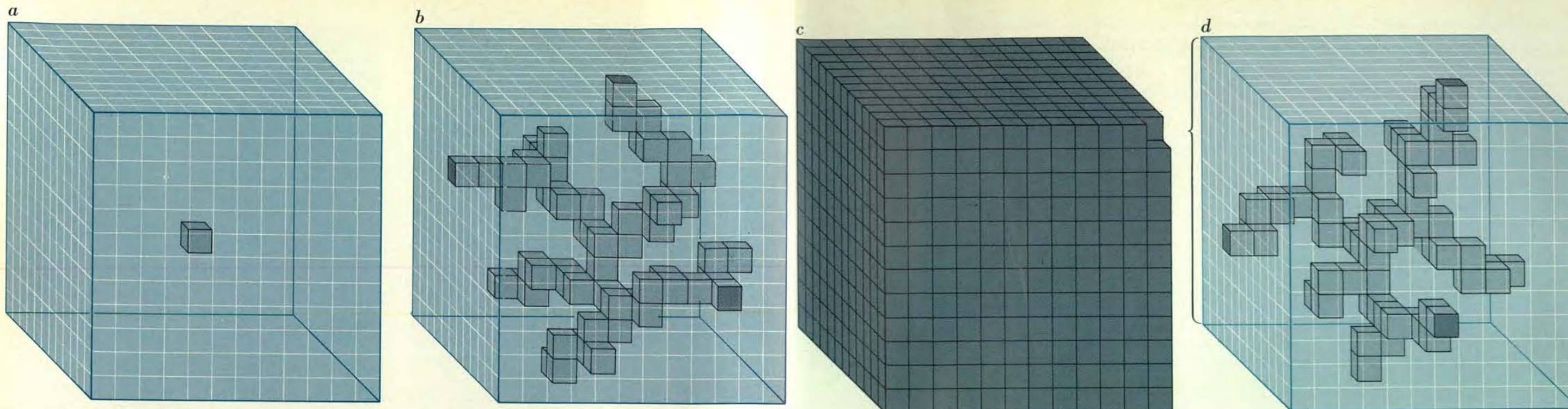
Entropia e informazione sono connesse da una semplice legge di conservazione, che stabilisce che la somma dell'informazione e dell'entropia è costante e uguale al massimo di informazione che si può avere dal sistema, ossia all'entropia sotto certe condizioni date. Esprimendo matematicamente questa legge, abbiamo che $H+I=$costante $=H_{max}=I_{max}$, dove $H$ (la lettera greca eta) e $I$ rappresentano i valori effettivi di entropia e di informazione, mentre $H_{max}$ e $I_{max}$ rappresentano i massimi valori possibili. Dunque un aumento d'informazione è sempre compensato da una uguale perdita di entropia.

Supponiamo che un sistema fisico disponga di otto (ossia $2^3$) possibili stati. In notazione binaria potrebbero essere indicati dai numeri 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110 e 111. La specificazione di uno stato particolare, per esempio quello indicato da 101, richiede tre cifre binarie, vale a dire la quantità d'informazione associata alla descrizione seguente: « Il sistema è chiaramente nello stato 101 ». Il grado di incertezza, ossia l'entropia, associato a questa descrizione è evidentemente nullo. All'estremo opposto, se non possedessimo alcuna informazione circa lo stato del sistema, saremmo costretti ad assegnare uguali probabilità a ciascuno degli otto possibili stati. In questo caso l'informazione è zero. Dato che la somma di entropia e di informazione è costante per il sistema, l'entropia deve ora essere di tre bit. In generale, se un sistema ha $2^r$ stati possibili, dove $r$ è un numero intero, allora la massima quantità di informazione o entropia è uguale al logaritmo in base 2 di $2^r$, ossia $r$.

*Un esperimento mentale*

Per i sistemi reali il numero dei possibili stati è molto grande ma non infinito. Il numero degli stati, e quindi anche la quantità massima d'informazione, sono limitati dal principio d'indeterminazione formulato da Werner Heisenberg. Secondo tale principio la conoscenza della posizione e del momento di una particella reale è limitata da una certa quantità irriducibile di indeterminazione, in modo che lo stato della particella non può essere specificato con maggior precisione di quella consentita dal principio d'indeterminazione. Ne deriva che qualsiasi sistema fisico può essere descritto con una quantità finita di informazione.

Per comprendere i rapporti tra cosmologia, entropia e informazione possiamo compiere un semplice esperimento mentale. In un angolo di una stanza in cui l'aria sia perfettamente calma viene aperta una bottiglia di profumo. Dopo qualche tempo un osservatore situato nell'angolo opposto della stanza riferisce di cominciare a sentire l'odore del liquido. Evidentemente le molecole di profumo si sono allontanate dalla superficie del liquido e dopo un certo numero di collisioni con altre molecole, seguendo un complicato percorso a zig-zag, hanno attraversato la stanza. Dopo un tempo sufficientemente lungo tutto il profumo sarà evaporato e le molecole di profumo saranno distribuite in modo uniforme nella stanza (*si veda la figura a pagina 27*).

L'esperienza e la seconda legge della termodinamica ci dicono che il processo è irreversibile: per quanto a lungo si aspetti le molecole di profumo non se ne torneranno mai spontaneamente nella bottiglia. Tuttavia non si tratta di un evento impossibile in linea di principio. Supponiamo di aver registrato l'intero esperimento su un film che ne riprendesse i dettagli microscopici, in modo da poter seguire individualmente ogni molecola nei suoi movimenti. Potremmo vedere allora come una singola molecola si distacca dalla superficie del liquido in seguito all'impulso ricevuto da una collisione. Il suo percorso av-

La teoria dell'informazione fornisce un'interpretazione quantitativa della distribuzione del fluido probabilistico. Lo spazio di fase è diviso in piccole celle di uguale ipervolume e nello stato iniziale si suppone che tutto il fluido sia contenuto in una cella (*a*). L'informazione richiesta per specificare questa distribuzione è pari al logaritmo in base 2 del numero delle celle. Con l'evolversi del sistema di particelle, il fluido passa a occupare sempre nuove celle (*b*) e alla fine la distribuzione è uniforme; ogni cella contiene un uguale volume di fluido (*c*). Lo stato del sistema è allora indeterminato e non occorre alcuna informazione per precisarlo. Ma se si esamina lo spazio di fase su scala più ridotta si trova che la distribuzione del fluido non è affatto uniforme. Dividendo ogni cella in altre celle (*d*) si dimostra che l'informazione necessaria per definire lo stato del sistema è restata invariata: è ancora il logaritmo in base 2 del numero delle celle. L'informazione dello stato iniziale sullo stato macroscopico del sistema è diventata informazione sullo stato microscopico. Si dimostra che se l'informazione microscopica è assente nello stato iniziale del sistema, allora tutta l'informazione macroscopica del sistema viene convertita in informazione microscopica.

viene tra collisioni continue con migliaia di altre particelle dell'aria, con le pareti del contenitore, con i muri della stanza, mutando ogni volta direzione e velocità. Dopo un certo tempo la ritroviamo ancora in movimento dall'altra parte della stanza. Se si proiettasse alla rovescia un film di questo tipo, si vedrebbero le molecole di profumo percorrere alla rovescia le loro complicate traiettorie per radunarsi tutte nella bottiglia e riunirsi a formare un liquido. Se isolassimo una singola molecola troveremmo che il suo percorso obbedisce a tutte le leggi della fisica, dato che le leggi che governano il moto delle molecole sono simmetriche rispetto al tempo. Nessuna caratteristica della traiettoria di una singola molecola è in grado di farci distinguere il film « vero » da quello alla rovescia. Perché allora respingiamo il film alla rovescia come registrazione di un fatto reale?

L'ovvia risposta è che nel film alla rovescia le condizioni iniziali sono molto particolari. Infatti all'inizio di questo film ognuna di una gran massa di molecole è su una traiettoria che alla fine la condurrà in un certo volume di spazio molto ristretto (la bottiglia di profumo) escludendo tutti gli altri volumi simili a sua disposizione (il resto della stanza). Uno stato iniziale di questo tipo è estremamente improbabile e ciò è stato considerato spesso una spiegazione sufficiente dell'irreversibilità dei processi termodinamici. Tuttavia è possibile spingere l'analisi più a fondo e chiedersi che cosa renda tanto improbabili queste condizioni iniziali.

### *Lo spazio di fase*

Per continuare l'analisi abbiamo bisogno di strumenti adatti alla rappresentazione del mutamento dello stato dinamico di un sistema contenente un gran numero di particelle. Lo spazio di fase fa al caso nostro.

Lo stato dinamico di una singola particella è completamente descritto dalla sua posizione e dalla sua velocità. Per esprimere queste quantità abbiamo bisogno di sei numeri: tre coordinate per la posizione e tre componenti per la velocità. In coordinate cartesiane i numeri corrispondono a posizione e velocità lungo gli assi $x$, $y$ e $z$. Questi sei numeri possono considerarsi come le sei coordinate di posizione di un punto in uno spazio a sei dimensioni, lo spazio di fase della particella. A ogni punto dello spazio di fase corrisponde un unico stato dinamico della particella nello spazio reale e il movimento della particella nello spazio reale si traduce in una curva nel suo spazio di fase tracciata dal suo punto di rappresentazione. Se conoscessimo la posizione e la velocità della particella in un istante potremmo predire ogni suo movimento successivo con la massima precisione; in altre parole, la storia dinamica della particella è completamente determinata dalle sue condizioni iniziali. Analogamente, nello spazio di fase l'intera curva è completamente determinata dal suo punto di origine. Inoltre il percorso del punto nello spazio di fase non può tornare su se stesso né biforcarsi (sebbene possa descrivere una curva chiusa). Infatti se tale percorso si intersecasse vi sarebbe uno stato della particella (quello rappresentato dal punto d'intersezione) con più di uno stato successivo e la storia dinamica della particella non sarebbe determinata in modo univoco.

Con la medesima tecnica è possibile descrivere un sistema chiuso composto da molte particelle interagenti. Lo stato dinamico di un sistema di $n$ particelle è specificato da $6n$ numeri: le tre coordinate di posizione e le tre componenti della velocità di ognuna delle $n$ particelle. Questi numeri possono essere considerati come le coordinate di un punto in uno spazio a $6n$ dimensioni; per descrivere il sistema dobbiamo specificare la collocazione di un singolo punto in questo spazio. Analogamente la storia dinamica del sistema è rappresentata da una curva nello spazio di fase che è determinata in modo completo e univoco dal suo punto di origine. Tale curva può avere una forma complicata o irregolare in relazione alle collisioni o a altre interazioni che si verificano tra le particelle, ma non può biforcarsi né tornare su se stessa.

La diffusione delle molecole di profumo nel nostro esperimento mentale è rappresentata da un'unica traiettoria in uno spazio di fase a $6n$ dimensioni, dove $n$ è il numero delle molecole di profumo. (Si tratta di un numero molto grande: per un grammo di profumo $n$ è pari circa a $6 \times 10^{20}$.) La traiettoria congiunge i punti che rappresentano lo stato iniziale e quello finale dell'esperimento, ma se potessimo esaminare questi punti non potremmo trovare alcuna differenza qualitativa tra di essi. Ognuno di essi può essere conseguenza dell'altro e la descrizione dei movimenti delle molecole è completamente reversibile.

L'analisi del nostro esperimento mentale compiuta per mezzo dello spazio di fase sembra abolire la freccia del tempo, imponendo un determinismo che non lascia spazio per la novità. Tuttavia si tratta di una descrizione dotata di una precisione che non è realistica. Si suppone infatti di possedere riguardo al sistema delle molecole di profumo e dell'aria una quantità d'informazione superiore a quella che di fatto è possibile avere. Di fatto non conosciamo le posizioni iniziali precise e le velocità delle $6 \times 10^{20}$ molecole di profumo, anche tenendo conto delle limitazioni imposte dal principio d'indeterminazione. Tutto ciò che possiamo dire è che sono confinate all'inizio in un certo volume, la bottiglia, ma non possiamo certo specificare le coordinate del punto che rappresenta il sistema nello spazio di fase. Tutto quello che possiamo dire è che tale punto deve essere compreso all'interno di un piccolo volume, o « ipervolume », dello spazio di fase a $6n$ dimensioni.

Allo scopo di rappresentare questa informazione rimpiazziamo il punto nello spazio di fase con una bolla costituita da un fluido immaginario che riempia in modo uniforme il piccolo ipervolume corrispondente alla nostra effettiva conoscenza dello stato iniziale. Il fluido immaginario rappresenta la probabilità e la massa di fluido in una regione dello spazio rappresenta la probabilità che lo stato dinamico del sistema corrisponda a un punto situato all'interno di quella regione (*si veda la figura alle pagine 30 e 31*).

Come si diffonde il fluido probabilistico nello spazio di fase man mano che le molecole di profumo si diffondono nello spazio fisico? Si potrebbe pensare che si espanda in tutte le direzioni, come il profumo, e che riempia alla fine tutto l'ipervolume in modo più o meno uniforme. Di fatto il comportamento del fluido è alquanto diverso.

Dato che i movimenti delle molecole di profumo sono determinati in modo completo dal loro stato iniziale (anche se questo ci è ignoto), il fluido probabilistico deve restare una singola bolla continua. Se dovesse spezzarsi in due o più bolle separate ciò significherebbe che esiste una storia dinamica rappresentata da una traiettoria che si biforca, fatto che come abbiamo visto è impossibile. Inoltre il volume della bolla non può cambiare, dato che è proporzionale al numero di stati distinguibili permessi dal principio d'indeterminazione e tale numero non può cambiare finché ogni stato definisce un'unica storia dinamica.

Da queste considerazioni si può concludere che il fluido probabilistico è continuo e incomprimibile e che quindi il suo comportamento è più simile a quello di un liquido che a quello di un gas. La sua espansione nell'ipervolume non avviene per una diminuzione di densità, come nel caso di un gas, ma estroflettendo dei « tentacoli » che diventano sempre più lunghi e stretti e sempre più numerosi man mano che il sistema si evolve. Il processo è stato paragonato da Gibbs a quello con cui l'inchiostro di China si diffonde in acqua ferma.

Col diffondersi del fluido probabilistico tramite l'emissione di tentacoli sem-

pre più sottili, l'ipervolume totale occupato dal fluido resta costante ma la forma della regione occupata diventa sempre più complessa. Dopo un periodo sufficiente di tempo il fluido sembrerà distribuito in modo uniforme nell'intero ipervolume, tuttavia quando lo si esamini nei minimi particolari si troverà che la distribuzione è tutt'altro che uniforme. In questa descrizione del nostro esperimento mentale abbiamo rilevato una differenza enorme tra lo stato iniziale e quello finale. All'inizio il fluido probabilistico è confinato in una piccola regione dello spazio di fase che occupa in modo uniforme, mentre il resto dell'ipervolume è vuoto. Nello stato finale il fluido occupa l'intero ipervolume. Da un punto di vista macroscopico esso sembra distribuito in modo uniforme, ma in scala microscopica rivela una distribuzione assai poco uniforme.

### *Il flusso dell'informazione*

La distinzione tra una distribuzione uniforme e una non uniforme del fluido probabilistico rappresenta una differenza qualitativa nel contenuto d'informazione del sistema. Per misurare l'informazione dobbiamo dividere la regione accessibile dello spazio di fase in piccole celle di eguale ipervolume. Per comodità supponiamo di ottenere $2^r$ celle, dove $r$ è un numero intero (*si veda la figura alle pagine 32 e 33*). All'inizio il fluido probabilistico è confinato in una delle celle. L'informazione richiesta per specificare lo stato è semplicemente il numero di cifre binarie necessario per specificare una particolare cella. Il numero di bit richiesto è il logaritmo in base 2 del numero delle celle, ossia $\log_2 2^r = r$. In conclusione lo stato iniziale dell'esperimento mentale può essere rappresentato da $r$ bit d'informazione.

Nello stato finale, quando il fluido è distribuito in modo uniforme, ognuna delle $2^r$ celle contiene lo stesso volume di fluido probabilistico. A quel livello di descrizione lo stato finale è completamente indeterminato e non occorre alcuna informazione per specificarlo. Nell'evoluzione del sistema sembra che sia scomparsa tutta l'informazione contenuta nello stato iniziale.

Se esaminiamo la distribuzione del fluido su una scala più ridotta riusciamo tuttavia a scoprire dove è andata a finire l'informazione. Se ogni cella contiene un volume uguale di fluido e se il volume totale del fluido non è mutato, allora all'interno di ogni cella il fluido probabilistico deve occupare solo $1/2^r$ del volume. Sebbene la densità del fluido non abbia subito variazioni, la forma della regione di spazio occupata è diventata ora molto complessa. Se si divide la cella in « microcelle » sufficientemente piccole si può dimostrare che l'informazione necessaria per specificare la distribuzione del fluido nell'intera regione dello spazio di fase è sempre $\log_2 2^r = r$. Quindi l'informazione macroscopica presente nello stato iniziale non è scomparsa ma si è semplicemente convertita in informazione microscopica nello stato finale.

Questa conclusione può essere generalizzata e precisata in modo esauriente. Comunque si decida di dividere lo spazio di fase in « macrocelle », possiamo definire l'informazione macroscopica come l'informazione necessaria per specificare l'insieme di probabilità associato a queste macrocelle; l'informazione necessaria per specificare la distribuzione del fluido all'interno delle macrocelle viene definita microscopica. Con l'evolversi del sistema chiuso di molecole, la quantità totale d'informazione necessaria per specificare la distribuzione del fluido probabilistico nello spazio di fase del sistema si mantiene a un livello costante, ma l'informazione macroscopica può essere convertita in informazione microscopica e viceversa.

Che cosa rappresentano questi due tipi di informazione? Possiamo identificare l'informazione macroscopica con la nostra conoscenza delle proprietà statistiche del sistema, e l'informazione microscopica con una conoscenza dettagliata dello stato delle singole molecole. In particolare l'informazione microscopica rappresenta la nostra conoscenza delle correlazioni esistenti tra le velocità delle particelle. Nel nostro esperimento mentale l'informazione microscopica era inizialmente assente, dato che nello stato iniziale non vi erano correlazioni tra le velocità delle molecole; la conoscenza della velocità di una molecola non ci avrebbe messo in grado di predire la velocità di qualsiasi altra molecola. Con l'evolversi del sistema le collisioni creavano delle correlazioni tra le velocità delle particelle e tutta l'informazione macroscopica presente si convertiva alla fine nell'informazione microscopica rappresentata da queste correlazioni.

Per certi tipi di sistemi fisici e sotto certe condizioni iniziali si può dimostrare che questo processo è inevitabile. Se l'informazione microscopica è assente all'inizio in un sistema composto da molte particelle interagenti, allora l'informazione necessaria per specificare lo stato macroscopico del sistema deve diminuire rapidamente finché si converte tutta in informazione microscopica. Teoremi di questo tipo sono stati dimostrati a partire dal 1946 (per particolari classi di sistemi fisici e per particolari definizioni del concetto di informazione microscopica) da Nikolai Bogolyubov, Leon C. P. van Hove, Ilya Prigogine, Radu Balescu, Mark Kac e altri.

Dato che l'informazione macroscopica invariabilmente diminuisce in quelle circostanze in cui l'entropia termodinamica aumenta, si è tentati di definire l'entropia termodinamica come infor-

Perturbazioni casuali provenienti dall'esterno del sistema di particelle tendono a dissipare l'informazione microscopica. In un sistema che non può comunicare con l'esterno (*a*) i percorsi delle particelle sono determinati e il fluido probabilistico nello spazio di fase in cui è rappresentato il sistema risulta incomprimibile. Tuttavia nessun sistema reale è veramente isolato. Le pareti di ogni contenitore trasmettono il calore e vi è inoltre l'interazione gravitazionale delle particelle con materia distante. Ne risulta che perturbazioni casuali distruggono tutta l'informazione sullo stato microscopico del sistema. Dato che lo stato futuro del sistema non è più predicibile a partire da quello presente, il fluido non sarà più incomprimibile (*b*); il suo comportamento assomiglierà più a quello di una nuvola di fumo che si espande fino a riempire tutto lo spazio di fase accessibile.

L'« universo giocattolo » consiste in una linea retta, infinita nei due sensi, e divisa in settori che possono essere occupati (*rettangoli scuri*) o vuoti (*rettangoli chiari*). Se la distribuzione dei rettangoli segue certe proprietà statistiche si può dimostrare che questo universo non contiene informazione microscopica. Per esempio, le proprietà specifiche di particolari successioni di rettangoli non hanno senso. Tali proprietà non possono distinguere una rappresentazione dell'universo da un'altra (*a*, *b*), dato che ogni successione finita esiste sicuramente in tutte le rappresentazioni infinite. Una particolare successione non può nemmeno designare un'unica posizione in una singola rappresentazione, dato che la stessa successione deve sicuramente ripetersi altrove (*c*). Questo ragionamento si può estendere all'universo reale, il quale soddisfa le condizioni statistiche richieste.

mazione macroscopica negativa. Infatti una definizione di questo tipo conduce immediatamente all'equazione presentata precedentemente: $H+I=H_{max}=I_{max}$. Interpretiamo ora $H$ come entropia termodinamica e $I$ come informazione macroscopica. L'entropia è allora sempre positiva o uguale a zero, e se il massimo dell'entropia resta costante, come deve accadere in un sistema chiuso, allora l'entropia deve aumentare col diminuire dell'informazione macroscopica. Abbiamo così ricondotto l'origine della freccia termodinamica del tempo a una proprietà degli stati iniziali dei sistemi chiusi. L'entropia di un sistema chiuso aumenterà solo se nel sistema è presente all'inizio l'informazione macroscopica mentre l'informazione microscopica è assente.

*Le perturbazioni casuali*

Queste condizioni iniziali speciali possono fornire una spiegazione della freccia termodinamica del tempo, ma non si tratta di una spiegazione molto soddisfacente. Perché in natura queste particolari condizioni iniziali sono regolarmente soddisfatte? L'informazione microscopica sembra abbastanza semplice da produrre. Perché compare solo negli stati finali dei sistemi naturali e mai in quelli iniziali? Che cosa significa affermare che l'informazione microscopica è assente da un certo stato? È sempre possibile acquisire tale informazione spendendo una quantità sufficiente di energia. Infine, che significato si può attribuire alla distinzione tra il livello macroscopico e quello microscopico di descrizione? Una risposta plausibile a questi problemi è stata data nel 1912 dal matematico francese Émile Borel. In tempi recenti i risultati di Borel sono stati riscoperti ed elaborati da John M. Blatt, Peter G. Bergmann, Joel L. Lebowitz e Philip Morrison.

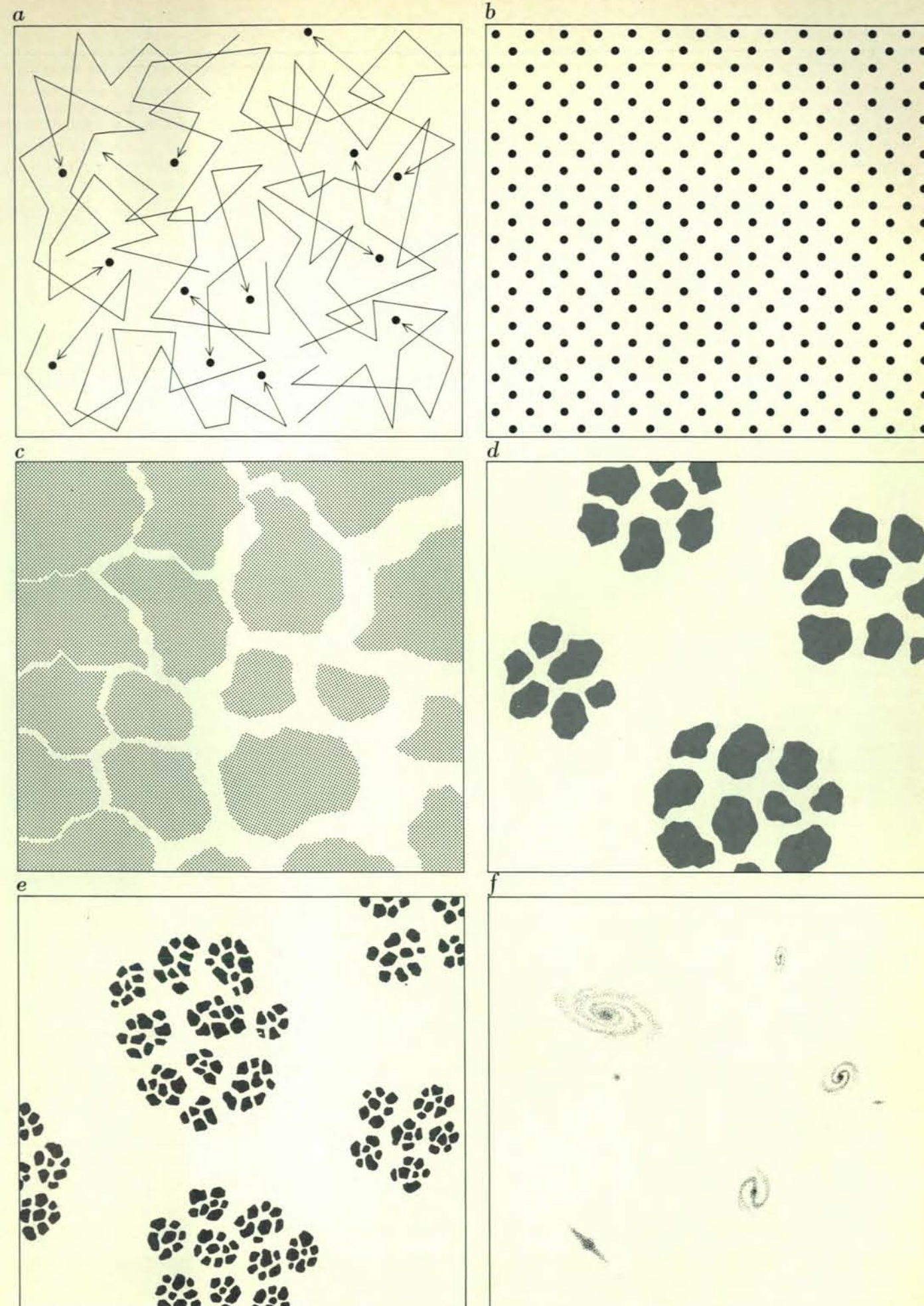
La nostra conclusione che l'informazione microscopica di un sistema aumenta col diminuire di quella macroscopica è valida solo per sistemi chiusi, cioè per sistemi che non comunicano con ciò che li circonda. Borel ha dimostrato che nessun sistema fisico finito può considerarsi chiuso. Si consideri per esempio la stanza in cui ha avuto luogo l'esperimento mentale della diffusione del profumo. Anche se la stanza non ha né porte né finestre, anche se le pareti sono isolate e molto spesse, il sistema di molecole non può essere isolato dal resto dell'universo. Le molecole di profumo e di aria entrano in collisione con le pareti della stanza, che sono in contatto col mondo esterno. Inoltre, fatto ancora più importante, è impossibile in linea di principio proteggere le molecole da interazioni gravitazionali con masse di materia anche lontane. Gli effetti di queste interazioni sono piccolissimi ma non trascurabili: Borel ha calcolato che il mutamento di potenziale gravitazionale prodotto dallo spostamento di un centimetro di un grammo di materia posto alla distanza di Sirio può alterare sostanzialmente nel corso di un microsecondo lo stato microscopico di un volume macroscopico di gas.

L'inevitabile interazione di un sistema chiuso solo di nome con il resto dell'universo ha l'effetto di una piccola perturbazione casuale che distrugge le correlazioni tra le velocità delle particelle. La perturbazione distrugge quindi l'informazione microscopica e ricrea di continuo le condizioni iniziali necessarie per garantire la degradazione dell'informazione macroscopica e la crescita dell'entropia termodinamica. Dato che non è più possibile considerare il sistema come isolato, la sua storia dinamica non sarà più completamente determinata. Il fluido probabilistico nello spazio di fase non sarà più incomprimibile, ma si espanderà come una nuvola di fumo fino a riempire tutto l'ipervolume disponibile (*si veda la figura di pag. 34*). Possiamo quindi concludere che nel mondo reale l'informazione macroscopica si trasforma in informazione microscopica, ma l'informazione microscopica viene distrutta da perturbazioni casuali.

*Il principio cosmologico*

Il ragionamento di Borel dipende dalla supposta casualità delle interazioni di sistemi nominalmente chiusi con il resto dell'universo. Se si conoscessero le posizioni e le velocità di tutte le particelle perturbanti si potrebbe estendere la definizione di sistema chiuso fino a includere le particelle perturbanti. Tuttavia anche questo sistema più grande sarebbe soggetto a perturbazioni provenienti dall'esterno. In ultima analisi saremmo costretti a includere nella nostra descrizione l'intero universo. Data una descrizione microscopica completa dell'universo (con tutte le limitazioni imposte dal principio d'indeterminazione) non ci sarebbe più nessuna distinzione qualitativa tra le due direzioni del tempo, perché una descrizione di questo tipo sarebbe simmetrica rispetto al tempo. Tuttavia una descrizione del genere è possibile, anche solo in linea di principio?

Ogni sistema fisico finito ammette una descrizione microscopica completa contenente una quantità finita d'informazione, e quindi si potrebbe pensare che anche l'universo nel suo complesso possa essere descritto compiutamente. Se la quantità d'informazione richiesta da una descrizione siffatta sia finita o no dipende solo dal volume finito o infinito dell'universo. (La cosmologia relativistica ammette entrambe le possibilità.) Tuttavia l'universo gode di certe proprietà specifiche che i suoi sottosistemi non condividono. In particolare ogni sottosistema finito dell'universo è limitato, mentre l'universo, finito o infinito che sia, si suppone illimitato. Inoltre esso sembra conformarsi a quello che chiamo principio cosmologico forte, secondo il quale nessuna proprietà statistica dell'universo definisce una posizione o direzione privilegiata nello spazio. Il principio cosmologico (normale), così denominato da Albert Einstein nel 1916, stabilisce che la distribuzione spaziale della materia e del movimento nell'universo è omogenea e isotropa, a parte irregolarità locali. La versione forte stabilisce inoltre che le irregolarità locali stesse devono essere omogenee e isotrope. Tale principio è strettamente connesso nelle sue conseguenze con la nostra ricerca sull'origine della freccia termodinamica del tempo. Dimostrerò che il principio cosmologico forte implica che l'informazione microscopica riguardo all'universo sia oggettivamente assente, nel senso che non è acquisibile o specificabile. Questa limitazione della nostra conoscenza rappresenta una indeterminazione di tipo cosmico, connessa ma diversa dall'indeterminazione richiesta dal principio d'indeterminazione di Heisenberg. Si tratta di una proprietà dell'universo nel suo complesso, non goduta però da sottosistemi limitati, per i quali l'informazione mi-

L'evoluzione dell'universo rappresenta una crescita dell'informazione macroscopica. In un modello progettato dall'autore e dai suoi collaboratori si suppone che lo stato iniziale sia privo d'informazione e di struttura. Nel periodo immediatamente successivo al « big-bang » (*a*) l'universo è in uno stato di equilibrio termodinamico mantenuto dalla rapida interazione tra particelle e dalla radiazione. Dopo un'espansione di circa 15 minuti l'universo si cristallizza, o congela, in una lega di idrogeno metallico ed elio (*b*). Poiché l'espansione cosmica continua questo universo solidificato si spezza in frammenti aventi più o meno la massa di un pianeta (*c*), che formano un « gas » nel senso che interagiscono tra loro frequentemente e casualmente come le molecole di un gas. Nel gas planetario possono verificarsi fluttuazioni di densità (*d*) per la coagulazione di gruppi di frammenti, fluttuazioni che diventano sempre più grandi col crescere delle dimensioni dei gruppi che si aggregano (*e*). Alla fine si costituisce una gerarchia di strutture, corrispondente alle stelle, galassie, gruppi di galassie che oggi vediamo (*f*).

croscopica si può specificare o acquisire liberamente.

È possibile illustrare la nozione di indeterminazione cosmica considerando un « universo giocattolo » costituito da particelle puntiformi distribuite casualmente ma con densità media uniforme lungo una linea retta infinita. Le proprietà statistiche di questo universo unidimensionale possono essere valutate con la massima precisione. Per esempio, possiamo valutare il numero medio di punti per unità di lunghezza con la massima precisione facendo la media su segmenti di retta sempre più lunghi. È possibile specificare qualche proprietà non statistica, o microscopica, di questo universo giocattolo? Che cosa costituirebbe una proprietà microscopica? Supponiamo di avere due rappresentazioni dell'universo in questione, identiche riguardo alle loro proprietà statistiche. Stabilisco che definire una proprietà microscopica significa trovare qualche modo di distinguere le due rappresentazioni, dato che l'unico tipo di informazione su cui si potrebbe fondare una tale distinzione è di tipo non statistico, e quindi microscopica.

Allo scopo di rappresentare gli effetti del principio d'indeterminazione dobbiamo dividere il nostro universo unidimensionale in celle di uguale lunghezza, dove la lunghezza rappresenta la precisione con cui si può specificare la posizione di una singola particella. Se allora specifichiamo il numero di particelle che occupa ogni singola cella, l'universo giocattolo viene a essere rappresentato da una successione di « numeri di occupazione » infinita e aperta da entrambi i lati. L'informazione microscopica è ora definita come un'informazione che ci potrebbe permettere di distinguere due successioni di numeri di occupazione dotate delle stesse proprietà statistiche (o macroscopiche). Per stabilire che due successioni sono differenti potremmo cercare di metterle in corrispondenza, cella a cella, per l'intera lunghezza. Tuttavia, dato che nessuna delle due successioni ha un inizio o una fine o un qualsiasi altro punto in qualche modo privilegiato, esistono infiniti modi di confrontarle. In linea di principio è impossibile eseguire una serie infinita di operazioni e quindi non è questa la via attraverso cui si può dimostrare l'impossibilità di una corrispondenza tra le due successioni.

Si potrebbe invece cercare di dimostrare che le due successioni sono identiche. Innanzitutto dovremmo formare da una successione di numeri di occupazione una sottosuccessione di lunghezza qualsiasi, quindi potremmo cercare un'identica sottosuccessione nell'altra successione. In una successione infinita qualsiasi sottosuccessione di lunghezza finita si presenta un numero infinito di volte. La legge dei grandi numeri garantisce il successo della nostra ricerca in un numero finito di tentativi. Inoltre l'esito positivo non dipende in alcun modo dalla lunghezza della sottosuccessione scelta, purché sia finita. Le due successioni sono indistinguibili dal punto di vista operazionale perché, se non fosse così, dovrebbe essere possibile mostrare almeno una sottosuccessione di una successione che non possiede duplicato nell'altra successione. Possiamo quindi concludere che esiste solo una successione infinita di cifre con le proprietà statistiche che definiscono l'universo giocattolo. Due rappresentazioni dell'universo con le stesse proprietà statistiche sono indistinguibili. Dato che l'informazione microscopica è, per definizione, ciò che potrebbe distinguere le due successioni, dobbiamo concludere che essa è oggettivamente assente.

Questo ragionamento si può estendere facilmente a modelli infiniti dell'universo reale tridimensionale che soddisfino il principio cosmologico forte e la condizione aggiuntiva che la scala della struttura locale sia finita. La disposizione delle stelle e delle galassie visibili dalla Terra è talmente complessa e specifica che sembrerebbe definire la nostra posizione nell'universo con la stessa precisione con cui un'impronta digitale identifica una persona, ma non è così. In un universo infinito, statisticamente omogeneo e isotropo c'è la certezza che la stessa disposizione di stelle e galassie si presenti ripetutamente. Se il nostro universo soddisfa il principio cosmologico forte le sue proprietà significative sono tutte statistiche e il suo stato microscopico è completamente indeterminato. A partire dal tempo di Newton è stato implicito nel pensiero cosmologico che l'universo, in linea di principio, possa essere completamente descritto a livello microscopico. Ora possiamo vedere come ciò non sia affatto necessario. Se l'universo è sufficientemente simmetrico non vi è spazio per l'informazione microscopica.

### *L'origine dell'informazione macroscopica*

Abbiamo visto come la freccia termodinamica del tempo tragga origine dall'assenza di informazione microscopica e dalla presenza di informazione macroscopica negli stati iniziali dei sistemi chiusi. Abbiamo trovato che in un universo che soddisfi il principio cosmologico forte l'informazione microscopica è oggettivamente assente. D'altra parte non siamo stati in grado di trovare ragioni che impedissero la mancanza anche dell'informazione macroscopica. La complessità dell'universo, come ci è svelata dall'astronomia, è davvero sconcertante. I sistemi isolati si avviano inevitabilmente verso uno stato indifferenziato di equilibrio termodinamico. Dato che anche l'universo è in un certo senso un sistema isolato, perché non ha ancora raggiunto l'equilibrio? Una risposta, che molti cosmologi sono pronti a fornire, è che di fatto l'universo tende a questo stato di equilibrio, ma che deve passare ancora del tempo prima che il processo sia compiuto. Fred Hoyle e J. V. Narlikar hanno scritto: « Nella cosmologia del « big-bang » l'universo deve partire con un forte squilibrio termodinamico e deve alla fine esaurirsi. » Dimostrerò che questo punto di vista è fondamentalmente scorretto. L'universo non va verso l'esaurimento e non è necessario che all'inizio della sua storia si sia verificato un forte squilibrio termodinamico; infatti lo stato iniziale può essere stato completamente privo sia di informazione macroscopica sia di informazione microscopica.

Supponiamo che in qualche momento vicino all'origine si a prevalso nell'universo un equilibrio termodinamico locale. L'entropia di ogni regione sarebbe stata allora la più grande possibile in base ai valori prevalenti di temperatura media e di densità. Con l'espandersi dell'universo da quello stato iniziale ipotetico, i valori locali di densità media e di temperatura si sarebbero modificati, e lo stesso avrebbe fatto l'entropia di ogni regione. Per mantenere l'entropia al suo valore massimo (e quindi per il mantenimento dell'equilibrio) la distribuzione dell'energia nella materia e nella radiazione deve variare, e lo stesso vale per la concentrazione dei vari tipi di particelle. I processi fisici attraverso cui si effettuano questi mutamenti procedono a un ritmo finito; se questi ritmi di « equilibrazione » sono molto più veloci di quelli dell'espansione cosmica, si manterrà localmente un approssimato equilibrio termodinamico, in caso contrario l'espansione darà origine a sensibili spostamenti dall'equilibrio a livello locale. Questi spostamenti rappresentano l'informazione macroscopica; la quantità d'informazione macroscopica generata dall'espansione è la differenza tra il valore attuale dell'entropia e il valore massimo teorico della medesima a livelli medi di temperatura e densità.

Questo ragionamento non dipende dall'ipotesi di una semplice espansione cosmica, ma dal ritmo finito a cui possono avvenire i mutamenti di densità e temperatura. Le stesse conclusioni si potrebbero trarre se l'universo si stesse contraendo da uno stato di equilibrio invece che espandendo: se il ritmo della contrazione fosse più veloce di quello di questi processi che mantengono l'equilibrio termodinamico, aumenterebbero sia l'informazione macroscopica sia l'entropia. Il nostro risultato non fissa quindi la direzione della freccia cosmologica rispetto a quella termodinamica, ma si limita a stabilire che l'informazione macroscopica e l'entropia sono generate dall'evolversi dell'universo da un ipotetico stato iniziale di equilibrio termodinamico locale.

È ragionevole supporre che l'universo sia stato (o sarà mai) in uno stato di equilibrio termodinamico locale? Per rispondere a questa domanda dobbiamo confrontare i ritmi dei processi di equilibrazione (quelli che generano entropia) e quelli dell'espansione o contrazione cosmica. Nessuno dei due è costante. Spostandoci indietro nel tempo verso l'origine il ritmo d'espansione aumenta, e all'origine del tempo il ritmo di espansione è infinito. Tuttavia anche i ritmi di equilibrazione aumentano man mano che ci spostiamo indietro nel tempo, dato che gli scontri tra particelle diventano sempre più frequenti con l'aumento della densità e della temperatura. Di fatto, nel periodo immediatamente successivo all'origine, i ritmi dei processi di equilibrazione sono molto più alti di quello dell'espansione cosmica. Ne deriva che il « big-bang » si presenta come un processo estremamente dolce, in cui i processi di equilibrazione locali tengono facilmente il passo delle mutazioni delle condizioni macroscopiche di temperatura e densità che avvengono nella prima frazione di un microsecondo. L'equilibrio termodinamico locale si può supporre solo per questa brevissima fase iniziale dell'evoluzione dell'universo, ma da questa assunzione deriva che l'espansione dell'universo ha generato sia l'informazione macroscopica sia l'entropia. Quindi la freccia cosmologica, quella storica e quella termodinamica si presentano come conseguenze del principio cosmologico forte e dell'assunzione che all'origine, o in un momento a essa molto vicino, sia prevalso uno stato di equilibrio termodinamico locale. È degno di nota che nessuna di queste assunzioni si riferisca direttamente al tempo o a processi temporali.

Rimane una domanda aperta, se si considera plausibile questa teoria. L'espansione cosmica genera i particolari tipi di informazione macroscopica che caratterizzano l'universo oggi? È possibile che parte dell'informazione sia stata presente fino dall'inizio, forse sotto forma di fluttuazioni di densità. Non è possibile ancora rispondere con sicurezza alla domanda, ma è importante notare che da un punto di vista teorico non è necessario che nello stadio iniziale fosse presente qualche tipo di struttura. Insieme ai miei collaboratori ho sviluppato un modello dell'evoluzione in cui si parte da una situazione di equilibrio termodinamico a temperatura zero (*si veda la figura di pagina 37*). È quindi possibile che l'universo, con tutta la sua ricchezza e la differenziazione delle sue parti, si sia sviluppato da uno stato completamente privo di informazione e di struttura. Se postuliamo l'esistenza di uno stato primordiale di questo tipo possiamo anche fare a meno di formulare separatamente il principio cosmologico forte. L'omogeneità statistica e l'isotropia dell'universo derivano dall'invarianza di tutte le leggi fisiche note rispetto a rotazioni e a traslazioni spaziali.

### *Novità e determinismo*

Abbiamo ora ricondotto a un'origine comune la freccia termodinamica e quella storica, vale a dire allo stato iniziale dell'universo. In tale stato l'informazione microscopica è assente e quella macroscopica è assente o minima. L'espansione a partire da questo stato ha prodotto tanto l'entropia quanto la struttura macroscopica. L'informazione microscopica, d'altra parte, non è presente nei sistemi astronomici di formazione recente, ed è questo il motivo per cui essi e i loro sottosistemi possiedono una freccia termodinamica.

La concezione di un mondo che si evolve nel tempo è radicalmente differente da quella che ha dominato nella fisica e nell'astronomia a partire dai tempi di Newton, una concezione che trova la sua espressione classica nelle opere di Pierre Simon de Laplace.

In questa prospettiva non c'è niente che corrisponda al passaggio del tempo, il passato e il futuro coesistono come termini uguali, come due semirette staccate da un punto che divide una retta. Tuttavia, se la teoria che ho presentato è corretta, nemmeno il sommo calcolatore, l'universo, contiene informazione sufficiente per specificare in modo completo i suoi stati futuri. Il momento presente contiene sempre un elemento di genuina novità e il futuro non è mai completamente predicibile. Poiché i processi biologici generano anch'essi informazione e la coscienza ci permette di sperimentare in modo diretto questi processi, la percezione intuitiva del mondo come qualcosa che si espande nel tempo coglie una delle caratteristiche più profonde dell'universo.

# La cataratta

*La forma senile è la più diffusa ed è dovuta a stress che si sommano al normale processo di invecchiamento dell'occhio. Una prevenzione sarà possibile conoscendo meglio la struttura e il metabolismo del cristallino*

di Ruth van Heyningen

Ogni anno più di un milione di persone soffre di un offuscamento o di una perdita completa della vista in seguito a una cataratta, malattia consistente in un deterioramento della trasparenza del cristallino dell'occhio. Attualmente esiste un rimedio parziale per questa malattia: la rimozione del cristallino e la sostituzione con le lenti degli occhiali. Tuttavia non esiste una autentica cura, né vi è alcuna prospettiva, in un prossimo futuro, di una sua scoperta. Inoltre non si conosce alcun mezzo per prevenire la forma più comune del disturbo, la cataratta senile, che rappresenta la stragrande maggioranza dei casi. È ovvio che al fine di prevenire una malattia occorre in primo luogo conoscere i fattori che la causano. Nel caso della cataratta senile esistono quasi certamente cause coadiuvanti che si sovrappongono ai normali processi di invecchiamento. La prevenzione della cataratta senile richiede, dunque, una approfondita conoscenza delle strutture del cristallino, del suo metabolismo e delle alterazioni indotte dalle influenze esterne e dall'invecchiamento, nonché una ricerca epidemiologica estesa alla popolazione di tutto il mondo. Nell'ultimo decennio si sono avuti in questi campi alcuni rilevanti progressi.

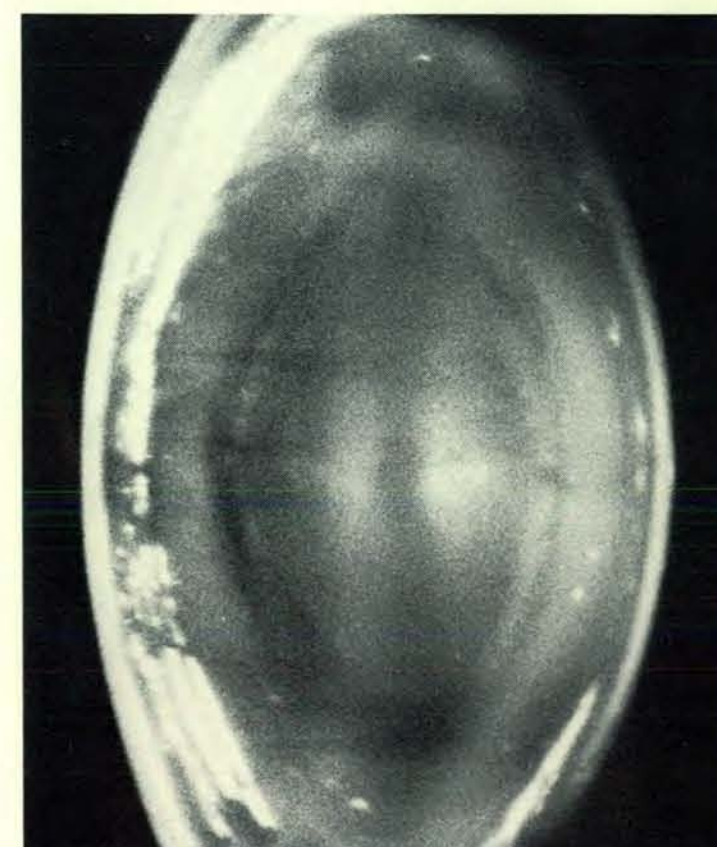
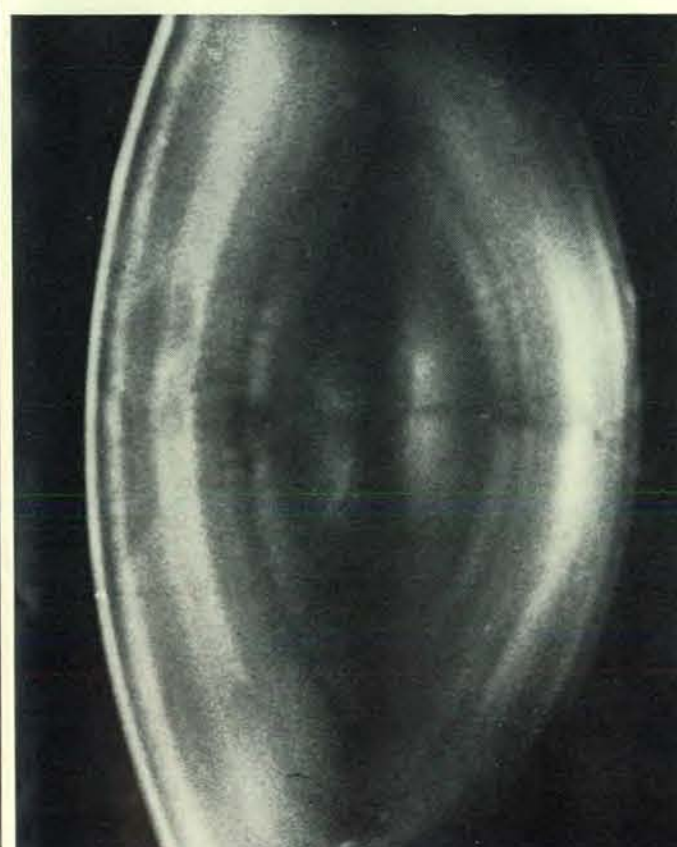
Non si sono finora effettuate molte indagini statistiche di sicura validità riguardo alla incidenza della cataratta, tuttavia è evidente che la cataratta senile è lungi dal rappresentare un'inevitabile conseguenza della vecchiaia. Una indagine relativa a un periodo di tempo di cinque anni, condotta sulla popolazione del distretto di Oxford in Inghilterra, rivelò che ogni anno veniva operato per cataratta solo lo 0,2 per cento degli uomini e lo 0,25 per cento delle donne al di sopra dei 65 anni d'età; l'età media dei pazienti era di 73 anni. Parimenti all'età di 65 anni la probabilità di dover essere operati entro i prossimi 10 anni è soltanto una su 50 per gli uomini e una su 40 per le donne, e confermano queste stesse probabilità alcuni dati ricavati sull'intera Inghilterra più il Galles.

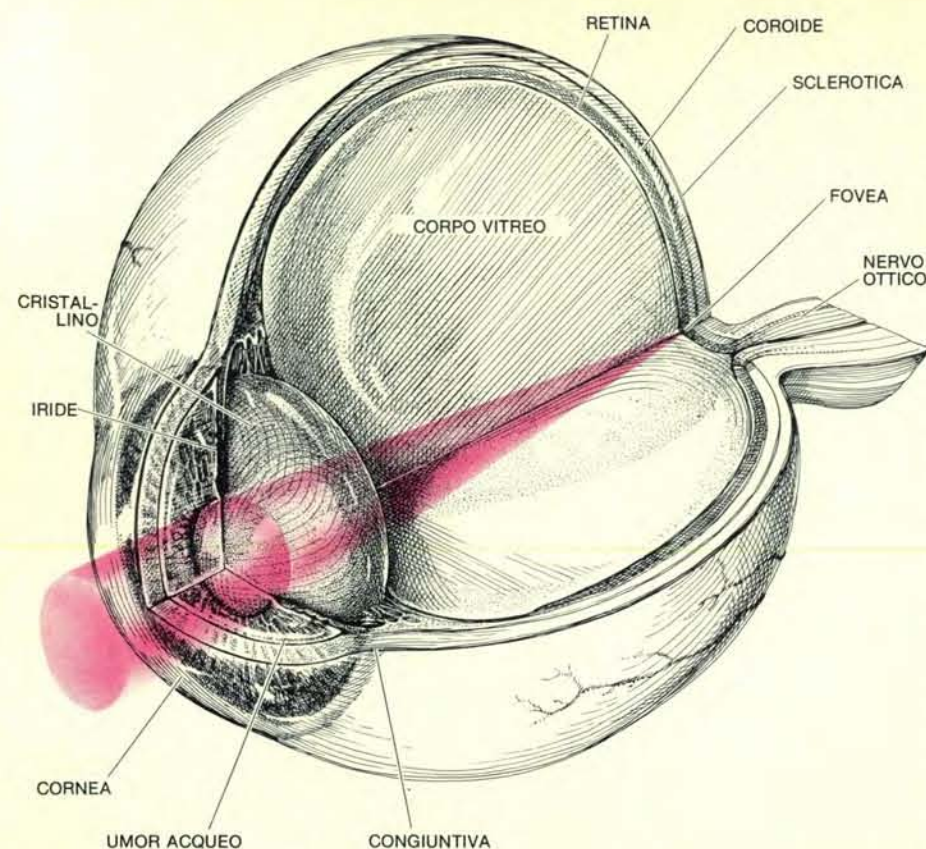
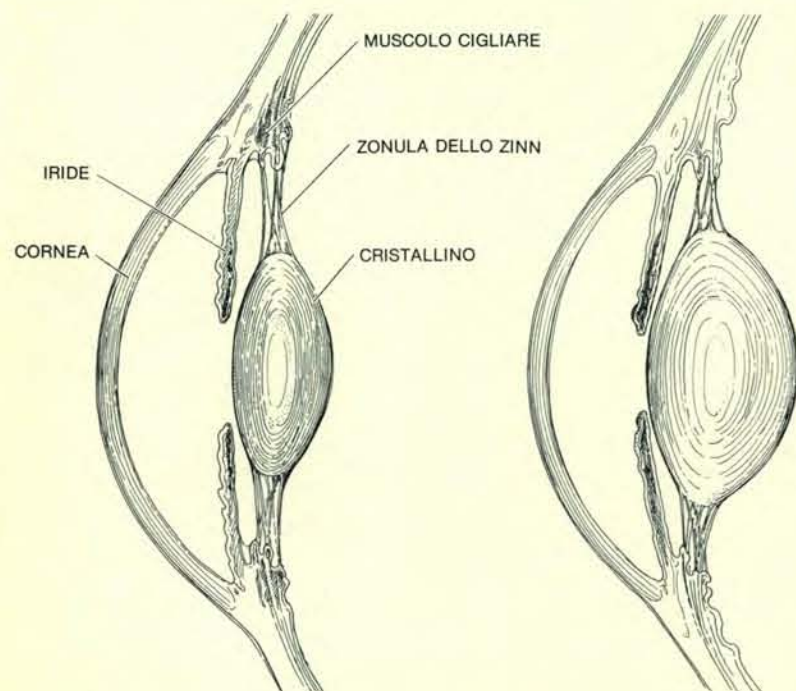
D'altra parte, qualora si ponga in risalto non tanto la bassa probabilità che una qualsiasi persona sviluppi una cataratta tale da giustificare il ricorso a una rimozione chirurgica, quanto il numero totale di persone che vengono sottoposte all'operazione, appare alquanto differente l'importanza della cataratta riguardo allo stato di salute e all'economia di una nazione. Nell'Inghilterra e nel Galles sono state eseguite 24 000 operazioni nel 1958. Negli Stati Uniti solo cinque altri interventi sono stati eseguiti più frequentemente. E la frequenza di casi di cataratta in Europa e negli Stati Uniti appare insignificante quando venga paragonata al numero di persone sofferenti di cataratta in altre parti del mondo, come il subcontinente indiano. Nella pianura del Punjab, per esempio, l'incidenza è drammaticamente alta, e l'età dei pazienti significativamente minore che in Europa: un'indagine statistica ha mostrato che il 22,5 per cento della popolazione compresa tra i 50 e i 59 anni di età soffriva di cataratta o aveva già subito la rimozione del cristallino in seguito a tale disturbo, e le cifre salivano al 31,4 per cento fra le persone di 60 anni o più anziane. Non esistono, per la popolazione del distretto di Oxford, statistiche del tutto comparabili a queste ultime, ma una deduzione fondata potrebbe indicare una frequenza del 2 per cento fra gli uomini e le donne al di sopra dei 60 anni. Molti più dati di questo genere si rendono necessari non solo per dare una misura del problema della cataratta, ma anche per fornire indicazioni epidemiologiche circa la sua eziologia.

Sebbene l'intervento di rimozione del cristallino non sia dei più complessi, la prevenzione sarebbe di gran lunga preferibile alla «cura» effettuata. L'intervento chirurgico può essere temuto dal paziente, che spesso aspetta e soffre per molti anni un progressivo deterioramento della vista dopo aver avuto il primo sintomo dello svilupparsi di una cataratta. La frequenza di esiti positivi dell'intervento è elevata, ma non sempre il risultato è del tutto soddisfacente per il paziente. Dopo l'intervento sono necessari tempo e pazienza per adattarsi alla nuova capacità visiva acquistata. Le spesse lenti che sono necessarie per sostituire il cristallino rimosso provocano aberrazioni ottiche: maggior ingrandimento dell'immagine, minore percezione della profondità e disturbi del campo visivo. A molti pazienti occorrono diversi mesi per abituarsi a questi effetti e alcuni sono permanentemente incapaci di tollerarli.

Gran parte del disturbo può essere eliminato sostituendo gli occhiali con lenti a contatto. Questa misura risulta particolarmente vantaggiosa per il paziente cui è stato rimosso il cristallino da un solo occhio e che ha ancora un occhio in grado di vedere normalmente; la visione binoculare e la percezione della profondità, che sono alterate dall'ingrandimento dovuto alle lenti degli occhiali, risultano migliori con l'uso di lenti a contatto. Un'altra soluzione per la quale si è recentemente riacceso l'interesse dopo alcuni insuccessi iniziali, consiste nell'impianto di una lente di plastica all'interno dell'occhio per rimpiazzare il cristallino colpito da cataratta. Tuttavia sia le lenti a contatto, sia l'impianto possono essere utilizzati solo da pochi privilegiati. Gli occhiali sono in tutto il mondo l'unico aiuto disponibile per la grande maggioranza dei pazienti.

Il cristallino normale è un corpo elastico, biconvesso, trasparente, di colore paglierino, di consistenza abbastanza morbida, racchiuso da una capsula di collageno resistente ed elastica. Esso è sospeso immediatamente dietro la pupilla per mezzo di un apparato di brevi fibre, detto zonula dello Zinn, che aderisce alla capsula intorno all'equatore, o periferia, del cristallino e irradia le sue fibre in fuori verso il muscolo cigliare, dove sono ancorate. I raggi di luce provenienti da un oggetto situato nel campo visivo vengono messi a fuoco sulla retina fotosensibile dalla cornea e dal cristallino. Il potere di rifrazione della cornea e del cristallino rilasciato è sufficiente per la visione lontana e per oggetti distanti 90 o 100 metri. Per mettere a fuoco oggetti più vicini il cristallino deve «accomodare». Il muscolo cigliare si contrae, formando un cerchio di minor diametro, in modo da ridurre la tensione della zonula. Quest'ultima rilascia a sua volta la capsula elastica e il cristallino, che è deformabile, diventa più spesso, il suo diametro si riduce e le sue superfici diventano più convesse (particolarmente la superficie anteriore), cosicché i raggi divergenti provenienti da un oggetto vicino vengono maggiormente deviati e messi a fuoco sulla retina. D'altra parte quando il cristallino è rilasciato per la visione a distanza, il raggio del muscolo cigliare è più ampio, la trazione esercitata sulla zonula è più forte e di conseguenza il cristallino assume una forma più appiattita.

Il deterioramento della visione ravvicinata col progredire dell'età è un processo normale e universale. La retina sana risente poco dell'invecchiamento; il deterioramento ha luogo nella parte anteriore dell'occhio e principalmente nel cristallino. Negli individui giovani la forma del cristallino viene facilmente alterata nel processo accomodativo, cosicché anche gli oggetti posti entro pochi centimetri di distanza dall'occhio vengono messi a fuoco distintamente. Nella maggior parte delle persone il punto prossimo comincia ad allontanarsi fra i 40 e i 50 anni di età e nei sessantenni il potere di accomodazione è generalmente perduto. La natura dei cambiamenti dei caratteri anatomici nella struttura del cristallino è

Queste tre fotografie ottenute da N. A. Brown con un microscopio munito di lampada a fenditura mostrano il cristallino sano di un individuo di 24 anni (*a sinistra*), il cristallino sano di un quarantacinquenne (*al centro*) e il cristal-

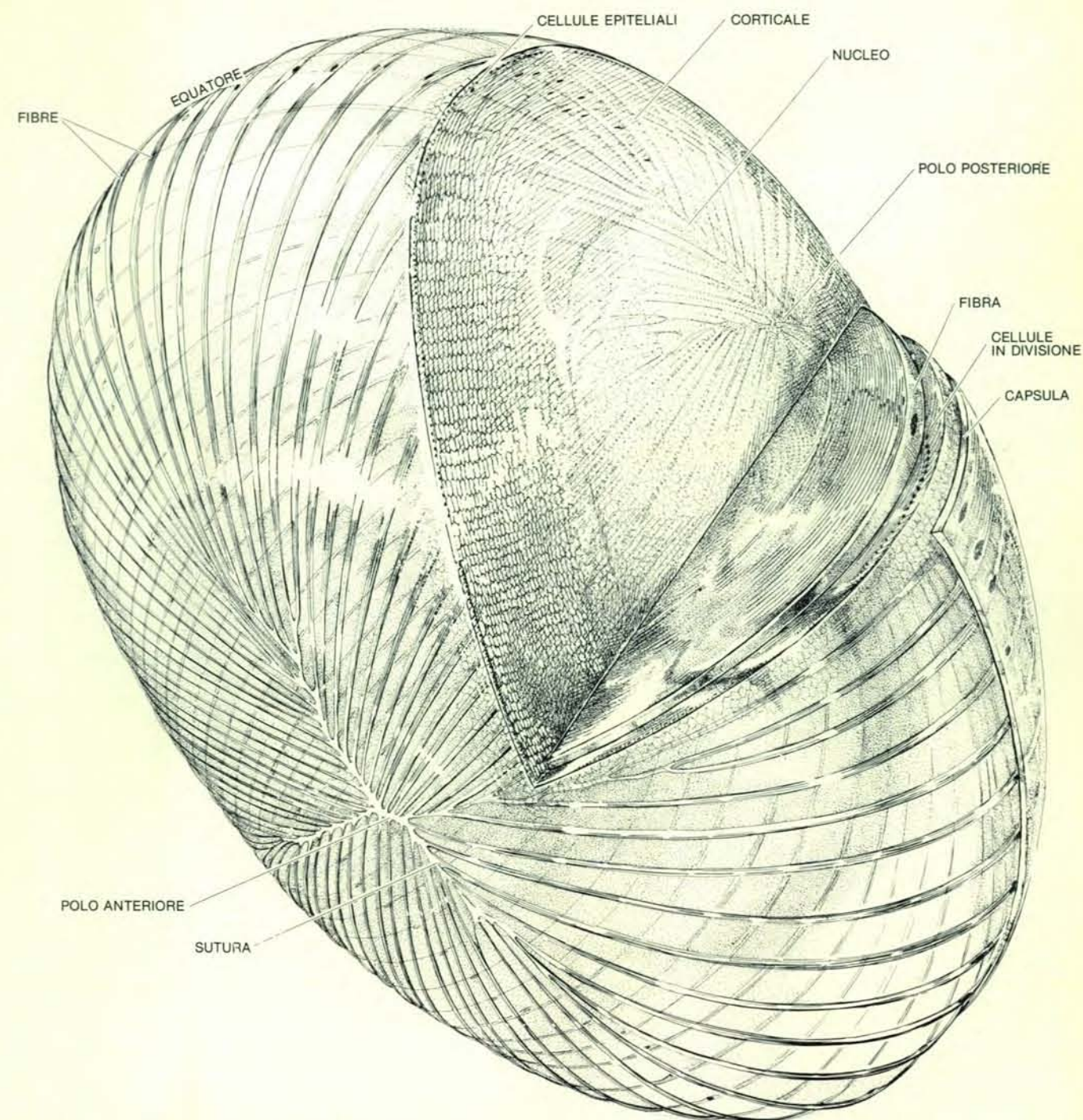
lino opacizzato di un cinquantenne. Le immagini sono state riprese mediante un microscopio a basso ingrandimento dotato di lampada a fenditura. Quando un sottile raggio di luce viene diretto nell'occhio con un dato angolo, la diffusione della luce ci permette di vedere una sezione trasversale del cristallino; in queste fotografie la superficie anteriore di ogni cristallino è rivolta a sinistra. Risulta evidente il normale aumento di spessore dovuto all'età, come anche le strisce corticali, ossia le superfici interne concentriche, presenti nei due cristallini sani. Le regioni luminose nel cristallino anormale sono opacità corticali: ossia zone dello strato esterno del cristallino, nelle quali la luce viene diffusa e che interferiscono con la visione.

**È qui rappresentato il bulbo oculare dell'uomo parzialmente sezionato in modo da evidenziare il cristallino biconvesso che, insieme alla cornea, mette a fuoco i raggi luminosi sulla retina. L'iride è il diaframma che regola le dimensioni della pupilla. L'umor acqueo trasporta l'ossigeno e le sostanze nutritizie al cristallino; il corpo vitreo è un gel che mantiene la forma del globo oculare. La sclerotica, la coroide e la retina rappresentano la membrana di sostegno, la membrana vascolare e la membrana sensoriale, le cui cellule nervose convertono l'energia luminosa in impulsi trasmessi al cervello.**

**Il cristallino è tenuto sospeso dalla zonula dello Zinn su cui è inserito il muscolo cigliare. La contrazione del muscolo ottiene l'accomodazione: l'incurvamento del cristallino che mette a fuoco sulla retina l'immagine degli oggetti vicini. Le figure rappresentano la parte anteriore dell'occhio in un giovane (*a sinistra*) e in un anziano (*a destra*). Con l'età la pupilla si restringe (indipendentemente dalle normali reazioni alla luce), il muscolo cigliare cambia forma e il cristallino diventa più spesso e incurvato.**

stata per decenni oggetto di controversia. Allo stato attuale sembra verosimile che vi siano implicati due processi: la capsula diventa più debole e più facilmente estensibile, e la sostanza costitutiva del cristallino diventa meno facilmente deformabile. Perciò la zonula estende o rilascia una capsula indebolita, che è in grado di produrre un effetto sempre minore nel deformare la sostanza del cristallino, che a sua volta diventa sempre più resistente.

Intorno alla pubertà il bulbo oculare raggiunge la sua grandezza definitiva, ma il cristallino, pur trovandosi dentro il bulbo, continua a crescere per tutta la vita. Il suo aumento continuo in grandezza rispecchia le sue uniche modalità di accrescimento. La maggior parte dei tessuti animali contiene una varietà di cellule di diversa origine embriologica, ma il cristallino è derivato interamente da un solo gruppo di cellule epiteliali. Nell'embrione di 5 settimane si forma la capsula, dopo di che il cristallino cresce entro di essa come un'entità isolata. La superficie anteriore del cristallino è coperta da un singolo strato di cellule cuboidali epiteliali: la crescita del cristallino ha origine interamente dalle successive divisioni di queste cellule in una stretta fascia situata appena davanti all'equatore. Le cellule neoformate gradualmente si allungano, tramutandosi in fibre; il cristallino cresce mano a mano che queste lunghe, sottili fibre vengono disposte e strettamente impacchettate tutto intorno alla periferia, appena dentro la capsula. Perciò la corticale, o strato esterno, del cristallino è costituita dalle fibre giovani, mentre il nucleo, o parte interna centrale, è costituito dalle fibre più vecchie. Anteriormente e posteriormente, le fibre, che possono essere lunghe fino a un centimetro, raggiungono una intricata struttura ricca di intrecci chiamata sutura (*si veda l'illustrazione nella pagina a fronte*).

Per adempiere alla sua funzione di messa a fuoco il cristallino deve conservare la sua forma e la sua trasparenza, e a questo fine contribuiscono processi metabolici attivi. Il cristallino non viene irrorato dal sangue, ma è circondato dai chiari e trasparenti umor acqueo e corpo vitreo. L'umor acqueo, che scorre lentamente dall'avanti all'indietro sulla superficie del cristallino, è il mezzo in cui sono disciolti l'ossigeno e le sostanze nutritizie a esso destinate. La molecola fornitrice di energia adenosintrifosfato (ATP) viene sintetizzata nel cristallino in primo luogo tramite il metabolismo anaerobico del glucosio (glicolisi), e, nello strato anteriore di cellule epiteliali, anche tramite il metabolismo ossidativo. Successivamente la sintesi di proteine, acidi nucleici e altre molecole che non sono fornite dall'umor acqueo viene alimentata dall'ATP, che libera anche l'energia necessaria per la regolazione osmotica e per il trasporto di ioni e di piccole molecole entro e fuori dalle cellule e dalle fibre. In altri termini, il cristallino è dotato di un metabolismo che è finemente accordato alla sua funzione caratteristica tanto quanto quello di qualsiasi altro tessuto: il cristallino rivela di essere tutt'altro che l'inerte «sacchetto» pieno di proteine che fino a poco fa si riteneva che fosse.

Tuttavia, esso effettivamente contiene una grande quantità di proteine. Il suo peso secco, che costituisce circa un terzo del suo peso totale, è dato pressoché interamente da proteine, tutte sintetizzate all'interno del cristallino: enzimi e proteine della membrana e proteine speciali, proprie del cristallino, di tre tipi: alfa, beta e gamma.

Per molto tempo fra i ricercatori e nei lavori concernenti la cataratta si presuppose semplicemente che quanto si era appreso su un cristallino di una specie di mammifero fosse direttamente applicabile per ogni altra specie, uomo compreso. Alla luce delle scoperte degli ultimi anni è apparso evidente che ciò

**Viene illustrata schematicamente la struttura del cristallino umano, con un'ampia rimozione della capsula, o involucro esterno, che permette di evidenziare le fibre che costituiscono il cristallino. La crescita del cristallino avviene per divisione delle cellule epiteliali in una striscia presso l'equatore. Le nuove cellule si allungano, formando le fibre, molto sottili e lunghe più o meno un centimetro, che si avvolgono intorno alla periferia del cristallino e raggiungono le suture, zone lineari dove si verificano complessi intrecci. Le fibre esterne sono dotate di nucleo e si presentano in sezione pressappoco esagonali; man mano che queste fibre vengono spostate verso il centro dalle fibre neoformate, esse cambiano forma e perdono i loro nuclei. Il cristallino è costituito per due terzi circa da acqua; il peso secco è in gran parte determinato da proteine specifiche.**

TRIPTOFANO

↓

FORMILCHINURENINA

↓

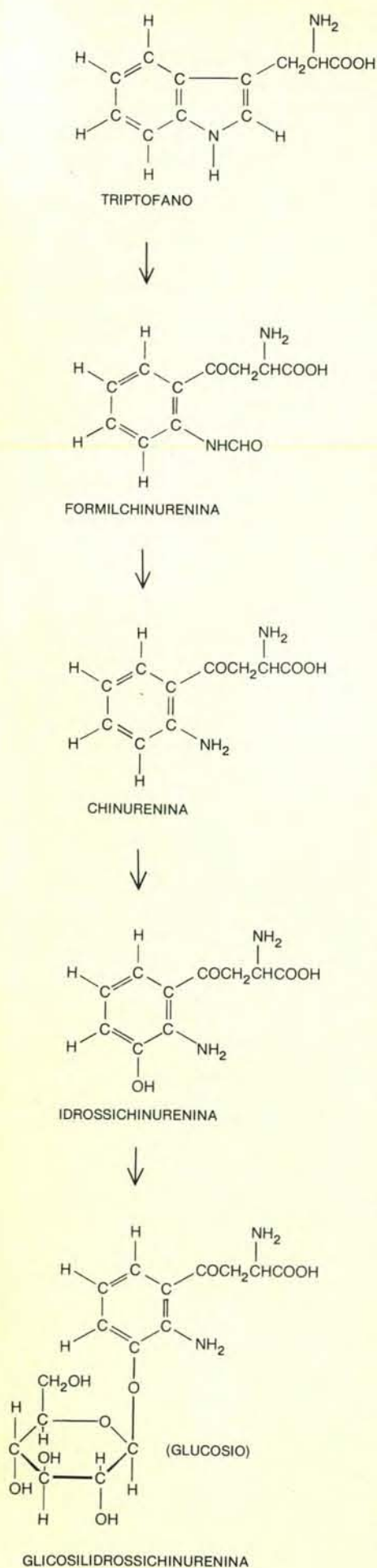
CHINURENINA

↓

IDROSSICHINURENINA

↓

(GLUCOSIO)

GLICOSILIDROSSICHINURENINA

non corrisponde al vero, che tali estrapolazioni possono essere fatte solo con grandi cautele, e che si può apprendere di più riguardo alla cataratta concentrando direttamente lo studio sul cristallino dell'uomo, esaminandolo sia nell'occhio (per mezzo di adatti strumenti ottici), sia dopo estrazione effettuata chirurgicamente o in sede di autopsia. Il fatto è che, sebbene il cristallino di alcuni primati, come i babbuini e le scimmie, sia probabilmente simile a quello dell'uomo, sussistono importanti differenze rispetto a quello degli animali che vengono normalmente utilizzati a scopo di ricerca, specialmente del ratto e del coniglio.

Alcune di queste differenze possono esse stesse fornirci significativi indizi su quali siano le cause che provocano la cataratta nell'uomo.

La prima differenza che è stata generalmente riconosciuta è data dal fatto che il cristallino dell'uomo continua a crescere in peso e in spessore, mentre quello di altri animali arresta prima il suo sviluppo. Nell'uomo il cristallino cresce per un periodo di tempo notevolmente lungo, aumentando il proprio peso da circa 90 milligrammi alla nascita a 150 milligrammi all'età di 20 anni, 190 milligrammi all'età di 40 anni e 240 milligrammi all'età di 80 anni.

Il cristallino dell'uomo si distingue da quello di altri animali anche per la sua capacità di accomodazione e per la sua struttura. Solo il cristallino dell'uomo altera la sua forma nell'accomodazione. Inoltre esso è il solo che non si presenti otticamente «vuoto». In fotografie riprese al microscopio con illuminazione a fenditura si possono vedere superfici concentriche parallele alle facce anteriore e posteriore (*si veda l'illustrazione alle pagine 40 e 41*). Le superfici presentano una certa analogia con i cerchi di crescita degli alberi: difatti esse aumentano con l'età dell'individuo. Inoltre deve certamente esistere una fondamentale diversità fra la struttura del cristallino di altri mammiferi e quello dell'uomo, in rapporto al suo potere accomodativo. Di certo il cristallino isolato si presenta diversamente al tatto. Il nucleo del cristallino di un coniglio adulto, di un bue o di un ratto, è duro; solo la sostanza corticale è morbida. Viceversa il cristallino normale presenta nell'uomo, anche anziano, un nucleo abbastanza molle, facilmente separabile dalla corticale, ma non più consistente di questa.

**Nel cristallino dell'uomo viene prodotto, attraverso la via metabolica illustrata, un composto unico: la glicosilidrossichinurenina. Dapprima l'amminoacido triptofano viene trasformato in idrossichinurenina, che si combina poi con il glucosio. Questo composto può migliorare la acuità visiva assorbendo la luce a breve lunghezza d'onda prima che arrivi sulla retina.**

La diversa consistenza rispecchia un diverso contenuto d'acqua. Negli altri animali la quantità di acqua presente nel cristallino diminuisce regolarmente per tutta la durata della vita, particolarmente per quanto riguarda il nucleo. Il nucleo del cristallino di ratto raggiunge un peso secco pari al 66 per cento del peso umido quando l'animale ha due anni di età; alla stessa età il nucleo del coniglio pesa a secco circa il 50 per cento, e quello del bue circa il 45 per cento del peso totale. Invece nell'uomo il peso secco del cristallino varia fra il 32 e il 36 per cento del totale durante il periodo che intercorre tra i 30 e i 90 anni di età.

La caratteristica più evidente del cristallino umano è quella di essere colorato, mentre quello della maggior parte degli altri animali è del tutto trasparente. Fino alla mezza età il cristallino si presenta nell'uomo di un colore giallo molto pallido. La colorazione si intensifica leggermente a partire dalla sessantina, riducendo di conseguenza l'intensità della radiazione blu o violetta che arriva sulla retina e facendo così apparire verde alle persone anziane ciò che in realtà è blu. La colorazione del cristallino è dovuta a proteine presenti nel tessuto, e probabilmente anche, almeno in parte, a certi metaboliti dell'amminoacido triptofano che sono presenti nel cristallino dell'uomo (e in quello di alcuni primati), ma assenti nei cristallini di altre specie.

Il derivato del triptofano che si trova nel cristallino umano alle concentrazioni più elevate è la glicosilidrossichinurenina, prodotta dalla combinazione a opera di un enzima del glucosio con la chinurenina, un composto fenolico derivato dal triptofano (e presente anche nell'umor acqueo) attraverso una via metabolica che non è stata riscontrata nel cristallino degli altri animali esaminati. Questo glicoside, recentemente scoperto, presenta particolare interesse in quanto assorbe fortemente le radiazioni ultraviolette, con un massimo in corrispondenza dei 368 nanometri di lunghezza d'onda, e impedisce perciò alle onde luminose al di sotto dei 400 nanometri di raggiungere la retina. Le radiazioni luminose di breve lunghezza d'onda sono maggiormente soggette ai fenomeni di dispersione e di diffusione, e quindi la presenza di questo filtro molecolare nel cristallino dell'uomo riduce le aberrazioni cromatiche e permette la formazione di una immagine meglio definita sulla retina. Il composto presenta un certo interesse anche perché in genere una sostanza viene prodotta solo per essere destinata all'escrezione, in una reazione in cui interviene generalmente, al posto del glucosio, l'acido glicuronico. Questo derivato del triptofano presente nel cristallino è il solo glicoside di questo tipo noto per essere presente come normale costituente di un tessuto di mammifero.

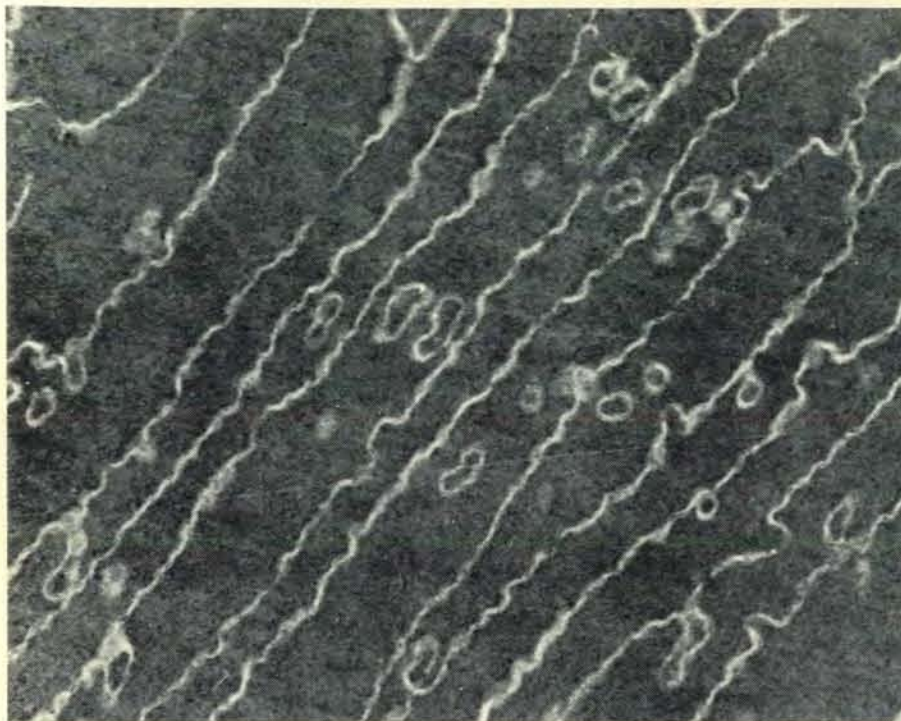
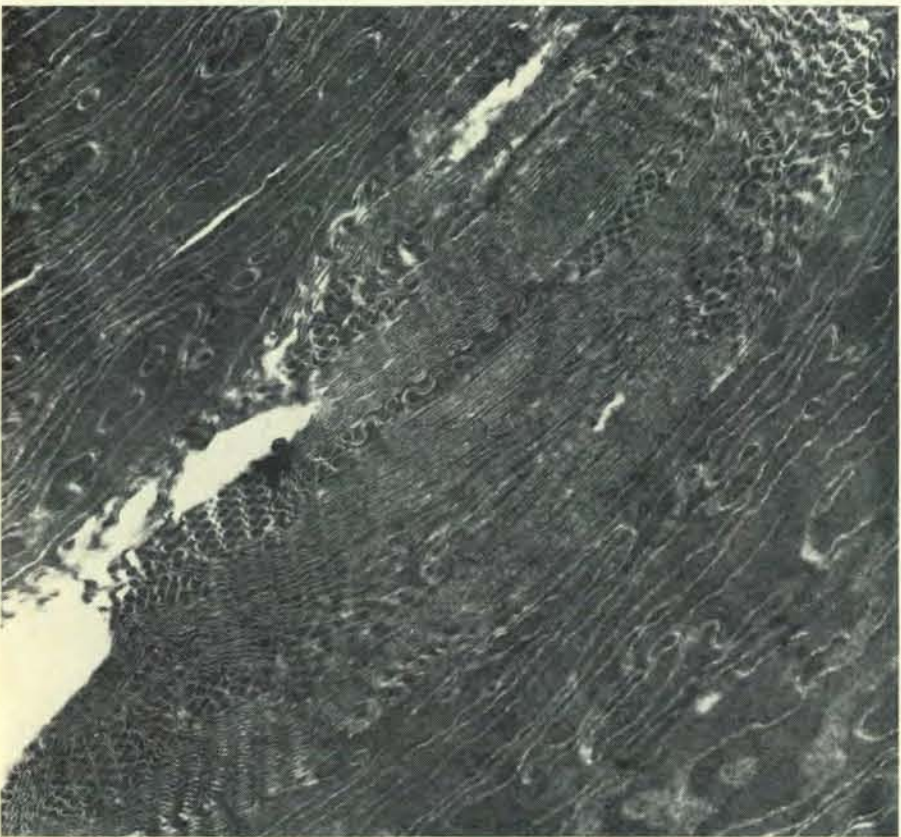
Quali sono i cambiamenti fisici e chimici della sostanza del cristallino che ne alterano la trasparenza? Cosa vediamo realmente osservando ciò che chiamiamo opacità del cristallino? Soltanto dieci anni or sono tali domande mettevano in grave imbarazzo i biologi, che semplicemente non conoscevano le risposte. Attualmente, grazie all'interesse dimostrato dai fisici per le proprietà ottiche del cristallino, siamo perlomeno in grado di descrivere una opacità, sebbene abbiamo solo un indizio delle cause per cui essa appare in un dato punto e in un determinato momento.

Una opacità del cristallino - ossia una cataratta - è una zona in cui la luce incidente viene diffusa. Ne consegue che la luce proveniente da un oggetto, che dovrebbe passare attraverso il cristallino e formare un'immagine ben definita, viene diffusa e forma solo un'immagine deteriorata, o, se la cataratta è abbastanza grave, non forma assolutamente alcuna immagine. La trasparenza del cristallino normale, in cui si ha scarsa diffusione, dipende dal regolare e graduale aumento dell'indice di rifrazione (che è funzione della concentrazione delle proteine) dalla superficie verso il centro del nucleo. Una piccola parte della luce che entra nell'occhio è diffusa dalla superficie del cristallino, dove si verifica un brusco cambiamento dell'indice di rifrazione dall'umor acqueo alla capsula e all'epitelio monostratificato posto dietro la capsula. Inoltre una piccola diffusione si verifica in corrispondenza degli strati concentrici e delle suture. Ciononostante, il cristallino normale è meravigliosamente trasparente, anche, in larga misura, grazie alla distribuzione uniforme delle proteine entro le fibre. Una macchia che diffonde la luce consiste in una zona dove si verifica una brusca o irregolare variazione della concentrazione delle proteine. Vi sono due tipi principali di cataratta senile: la forma corticale e quella nucleare. Spesso nello stesso cristallino si riscontrano entrambe le forme, che progrediscono a diversa velocità e si assommano ai normali cambiamenti conseguenti all'aumento di spessore e di colorazione che inevitabilmente sopravviene con l'età.

**Le tipiche forme di cataratta senile sono poste in relazione con la struttura del cristallino, come rappresentato in questo disegno molto schematico. La cataratta nucleare (*a*) implica alterazioni delle proteine del nucleo che si scurisce e che può anche provocare la diffusione della luce. Quando viene turbata la regolare disposizione delle fibre si formano opacizzazioni corticali « cuneiformi » (*b*); fra le fibre compaiono interruzioni occupate da frammenti e acqua, che alterano l'indice di rifrazione e diffondono la luce.**

Nella cataratta corticale le zone opache dello strato esterno del cristallino sono spesso visibili all'esame dell'oftalmologo e riconosciute come «cuneiformi», «a corona», «a raggio di ruota» o «a bietta», per il loro aspetto. L'opacità ha origine da una modificazione della regolare disposizione delle fibre; esse si gonfiano, si distorcono e lasciano fra loro spazi pieni di liquidi e di frammenti. Queste anomalie danno a loro volta origine ad ampie e irregolari discontinuità nella distribuzione delle proteine delle fibre, e di conseguenza a discontinuità nell'indice di rifrazione. In molti cristallini affetti da queste alterazioni si ha in coincidenza un evidente difetto metabolico, rappresentato da un forte aumento del contenuto di sodio. Quando si formano all'equatore del cristallino, oltre la normale apertura della pupilla, le opacità corticali interferiscono poco con la visione, e possono impiegare molti anni per estendersi verso il centro e ridurre gravemente il *visus*. Esiste tuttavia un tipo discretamente comune di opacità corticale, che diventa subito inabilitante, rappresentato da una alterazione che si verifica appena al di sotto della capsula nella parte posteriore del cristallino e in corrispondenza del centro della pupilla. Una tale cataratta polare può coinvolgere una parte assai ridotta della sostanza del cristallino, eppure interferire notevolmente con la visione.

Una cataratta nucleare è la conseguenza di un lento cambiamento verificatosi nelle proteine della parte più interna del cristallino. Col tempo il nucleo diventa giallo cupo, marrone e talora quasi nero. Essendo posto in corrispondenza del centro della pupilla, il nucleo alterato interferisce gravemente con il processo visivo, sia a causa del colore in sé, sia perché si formano aggregazioni di molecole proteiche abbastanza grosse da provocare la diffusione della luce. L'analisi biochimica rivela che le catene polipeptidiche ripiegate del cristallino sembrano essersi distese. Nel processo degenerativo certi gruppi solfidrilici, normalmente «nascosti», vengono esposti all'ossidazione, con la conseguenza che si formano ponti disolfuro (S-S) fra ed entro le molecole. Questi ultimi, assieme ad altri legami covalenti non ancora noti, legano insieme le catene proteiche formando nuove proteine di peso molecolare molto elevato ossia superiore ai 50 milioni di dalton (un dalton è uguale a $1,6603\ 10^{-24}$ grammi).

Noi non sappiamo ancora quali fenomeni diano inizio alle alterazioni di diffusione della luce nella sostanza cor-

In una microfotografia elettronica ripresa da A. J. Bron, K. J. Dilley e J. O. Habgood del Nuffield Laboratory of Ophtalmology dell'Università di Oxford appaiono, ingrandite 18 000 volte, le fibre di un cristallino normale situate in una zona appena sotto la capsula presso la superficie anteriore del cristallino. Le fibre, delimitate da membrane, sono disposte secondo un ordine piuttosto regolare. I cerchi e gli occhielli rappresentano varie sezioni di dispositivi giunzionali a bottoncino fra fibre contigue.

In questa microfotografia appaiono, a un ingrandimento simile a quello della fotografia in alto, le fibre di un cristallino alterato in un caso di cataratta. La sezione del cristallino comprende parte di una piccola, densa opacizzazione situata appena sotto la capsula in corrispondenza della superficie anteriore del cristallino. Si nota un brusco cambiamento fra una zona di fibre piuttosto normali (*a destra in basso*) e la zona adiacente opacizzata (*da sinistra in basso verso destra in alto*), in cui le membrane delle fibre si ripiegano e formano strati strettamente ammassati e altre strutture complesse.

ticale e nel nucleo. Sembrerebbe che, in origine, entrambe le forme di cataratta siano causate da fattori metabolici. La ragione per cui le fibre diventano disordinate e si separano nella sostanza corticale, ma non nel nucleo può essere dovuta al fatto che le membrane delle fibre della corticale sono intatte, mentre quelle del nucleo sono degenerate e non presentano alcun ostacolo al passaggio di sostanze che disturbano l'equilibrio osmotico delle fibre.

È evidente che i cristallini più vecchi si trovano in condizioni sfavorevoli che possono predisporli alla cataratta. In primo luogo, l'aumento di volume del cristallino in rapporto a quello dell'umor acqueo e del corpo vitreo può far sì che l'apporto di ossigeno e di sostanze nutritizie sia pericolosamente vicino al limite inferiore della sufficienza. Inoltre, la sostanza costitutiva del cristallino diventa pressoché incapace di alterarne la forma, ma continua a essere soggetta alle forze esercitate dai legamenti della zonula attraverso la capsula. L'occhio tenta di accomodare, ma il cristallino resiste alla deformazione e di conseguenza deve sopportare continui stress meccanici. Questo inconveniente si verifica particolarmente fra i 55 e i 60 anni, dopo di che la capsula perde energia e sul cristallino viene applicata una forza minore. Ronald Fisher dell'Istituto di oftalmologia dell'Università di Londra ha rilevato che talune opacità a forma di bietta viste negli occhi di persone anziane possono essere indicazione di danni provocati sulle fibre del cristallino dagli sforzi meccanici subiti tra i 55 e i 60 anni.

Come ho già detto, si pensa che la cataratta senile sia causata da particolari stress che si assommano alle normali conseguenze dell'invecchiamento. Uno di tali stress è stato identificato nel diabete. Nel distretto di Oxford fra il 1957 e il 1962 una persona affetta da diabete aveva da quattro a sei probabilità di essere operata per cataratta che non un diabetico dello stesso sesso e della stessa età. Si sono ottenuti risultati simili da almeno altre nove statistiche a partire dal 1920. È chiaro che il diabete costituisce un fattore coadiuvante nell'insorgere di una cataratta e noi ora abbiamo una idea valida del meccanismo con cui esso agisce. Le prove derivano da esperimenti condotti su animali: questo rappresenta un caso in cui i risultati ottenuti sugli animali possono essere validamente impiegati alla soluzione del problema dell'uomo.

Nel cristallino è presente un enzima, aldosoreduttasi, che è pressoché inattivo quando la concentrazione del glucosio è su livelli normali. Tuttavia, in risposta all'aumento del livello di glucosio presente nell'umor acqueo (come nel sangue), caratteristico del diabete, l'enzima catalizza la riduzione del glucosio, con formazione dell'alcool polivalente sorbitolo. La presenza di sorbitolo, che viene rimosso solo lentamente dal metabolismo del cristallino o dal flusso dell'umor acqueo, aumenta la pressione osmotica all'interno delle fibre, cosicché il cristallino assorbe acqua dall'umor acqueo e dal corpo vitreo. Quando si induce un diabete sperimentale nel ratto, mantenendo quindi un alto livello di glicemia, si forma continuamente più sorbitolo e una sempre maggior quantità d'acqua viene risucchiata nel cristallino. Le fibre rigonfie di liquido vanno incontro ad ampia degenerazione: questo fatto provoca ulteriori effetti deleteri ai quali il metabolismo del cristallino è incapace di opporsi, e infine il cristallino perde la sua trasparenza.

Nell'uomo si può osservare una sequenza analoga di eventi nel diabete giovanile non ben controllato, con lo sviluppo di una cataratta diabetica che progredisce rapidamente. Viceversa non si rileva questa rapida progressione nei diabetici anziani colpiti da cataratta; si è riscontrato tuttavia che anche i loro cristallini contengono elevate quantità di sorbitolo. Sussiste perciò un'alta probabilità che il sorbitolo sia il fattore tossico implicato nello sviluppo della cataratta nei diabetici e che spieghi l'elevato numero di interventi che sono effettuati su questi pazienti. (Si dovrebbe ricordare che, sebbene l'aldosoreduttasi sia ampiamente distribuita nei tessuti, solo nel cristallino, e forse nelle cellule nervose e nelle piramidi renali, esiste la possibilità che si verifichino danni osmotici causati nel diabete dall'accumulo di sorbitolo.)

Non è possibile distinguere la cataratta senile del diabetico, in cui è implicata l'accresciuta pressione osmotica nel cristallino, dalla cataratta senile dei non diabetici. Questo fatto porta a due interessanti considerazioni. In primo luogo studi di popolazione mostrano un aumento con l'età del livello della glicemia dopo un pasto o dopo l'ingestione di una dose di glucosio; l'aumento può essere dell'ordine di 8-13 milligrammi per dieci anni di età. Forse il sorbitolo è il fattore che provoca l'insorgere di una cataratta senile in alcuni pazienti non diabetici esattamente come nei diabetici. A causa dei livelli variabili di sorbitolo presenti nel cristallino in corrispondenza dei livelli fluttuanti di glucosio nel sangue e nell'umor acqueo possono essere esercitati pericolosi stress osmotici sulle fibre del cristallino che sta invecchiando. È altresì possibile che tutt'altri fattori, ignoti a tutt'oggi, siano responsabili in alcuni casi della elevata pressione osmotica della sostanza del cristallino e quindi di una cataratta.

Un altro fattore ancora dello sviluppo della cataratta senile può essere di natura ereditaria. Molti oftalmologi, e anche non specialisti, ritengono che la cataratta sia un disturbo ricorrente in certe famiglie. Benché vi siano poche famiglie in cui si riscontrano interessanti e ben riconoscibili quadri di opacizzazione del cristallino, tuttavia non sussiste ancora alcuna prova dell'esistenza di un fattore genetico.

Il discorso può essere esteso ai deter-

L'effetto del sorbitolo, che può provocare l'insorgere di cataratte nei diabetici, fu dimostrato da Jin H. Kinoshita che ha incubato cristallini di coniglio in un mezzo ricco di glucosio. Durante i primi quattro giorni il livello di sorbitolo (*in nero*) aumenta e l'acqua (*in colore*) entra nel cristallino per osmosi; durante questo periodo il cristallino può ritornare in condizioni normali se viene posto in un mezzo povero di glucosio. Tuttavia, dopo quattro giorni, il cristallino non è più in grado di conservare il suo equilibrio ionico; il sodio (*in grigio*) penetra nel cristallino, il sorbitolo si diffonde all'esterno, le fibre sono danneggiate e si ha la cataratta. Questi effetti non sono stati osservati in cristallini incubati in mezzi poveri di glucosio e di uguale osmolarità.

La frequenza di interventi di rimozione del cristallino per cataratta è più bassa nei vari gruppi di età di Oxford (*in grigio*), che non in comunità israeliane formate da persone di origine europea (*in colore intenso*) ed extraeuropea (*in colore chiaro*).

minanti razziali. Il tasso di interventi sul cristallino effettuati in Israele risulta più alto di quello del distretto di Oxford, ed è più alto fra gli israeliani di origine non europea che non fra quelli di origine europea. Queste differenze potrebbero derivare in ampia misura da fattori quali il sesso, i requisiti visivi, l'alimentazione e le abitudini di vita. Potrebbe in parte essere di origine razziale la differenza grandissima fra i dati relativi all'Europa e quelli relativi a regioni dell'India. D'altro canto, quando presi in esame i 1021 interventi eseguiti nel giro di tre settimane del gennaio 1970 al Sir Henry Holland Christian Hospital di Shikarpur nel Pakistan, notai che i pazienti erano di diverse origini razziali e i medici non credevano che una razza andasse maggiormente soggetta al disturbo di un'altra. Sono state suggerite in gran numero altre cause possibili per spiegare l'alto tasso di interventi di cataratta in regioni del subcontinente indiano: la luce solare molto intensa, la polvere, la disidratazione, l'invecchiamento prematuro e il contenuto in minerali dell'acqua. Da altri sono stati presi in considerazione anche fattori immunologici e dietetici. L'ipotesi più plausibile per molte ragioni è che la luce del Sole, e in particolare le sue componenti ultraviolette, abbiano l'effetto di scurire le proteine del cristallino. Finora tuttavia l'esame del cristallino umano non ha convalidato la presenza di proteine fotoossidate.

Talvolta la somministrazione di farmaci accelera drasticamente lo sviluppo di una cataratta senile. Per un certo numero di farmaci la cataratta si è rivelata come il più serio degli effetti collaterali, provocando il ritiro dal commercio del farmaco o un suo uso più prudente. (Talora la cataratta risulta il minore dei mali per il paziente, se il farmaco occorre per la terapia di qualche malattia più grave.) Esistono molti casi in cui si sono indotte cataratte sperimentali in animali, per mezzo di somministrazione di farmaci o di altri composti chimici. Solo recentemente si è introdotto l'uso della pratica di esaminare regolarmente i cristallini di animali utilizzati per la sperimentazione preliminare dei farmaci, così che i composti eventualmente responsabili dell'insorgere di una cataratta possano essere scartati a livello di uno dei primi stadi della sperimentazione.

Lo studio di importanza fondamentale della cataratta nell'uomo richiede la collaborazione di oftalmologi, ricercatori di laboratorio e statistici. Questa collaborazione era un tempo molto rara. Il fatto che ora stia prendendo piede in varie parti del mondo è un segno che lascia sperare in nuovi progressi nella comprensione di questa malattia.





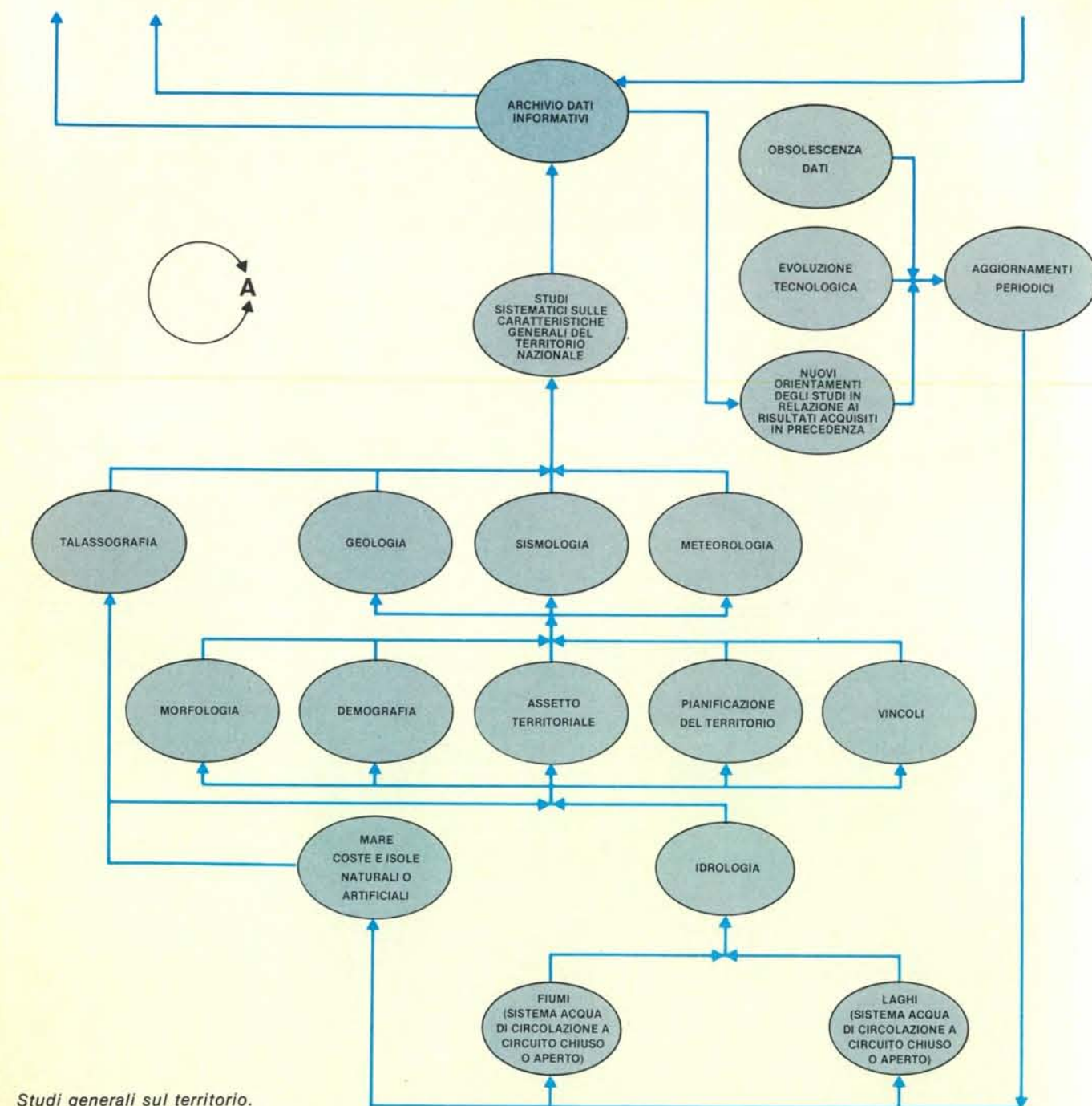
# CENTRALI ELETTRICHE E PIANIFICAZIONE DEL TERRITORIO

Un *Atlante delle caratteristiche territoriali primarie delle coste italiane,* redatto dall'ENEL, fornisce un criterio nuovo di rappresentazione del territorio per la localizzazione delle future centrali elettriche.

Da diversi anni l'ENEL sta svolgendo un'azione continuativa di studi e rilevazioni sull'intero territorio nazionale per poter disporre di una "banca di dati" relativi a tutti gli aspetti - topografici, ambientali, demografici, economici, ecc. - che devono essere conosciuti per poter disporre di un quadro ragionato e documentato delle aree interessanti ai fini dell'insediamento di nuove centrali elettriche.
Il grafico che correda questo articolo e che rappresenta le diverse fasi della formazione della "banca", non richiede spiegazioni, salvo la precisazione che ogni elemento della figura non rappresenta un'attività elementare, bensì un complesso di attività che presuppone il lavoro continuo e sistematico di un ufficio.
Poiché le attuali scelte della programmazione nel settore dell'energia, sanzionate dal Piano Energetico, postulano uno sviluppo elettrico, negli anni futuri, basato esclusivamente sulle centrali elettronucleari (a parte quei pochi impianti termoelettrici convenzionali già programmati e per i quali è già stata indicata l'ubicazione), assume un aspetto fondamentale, nell'ambito di questa azione di studi e rivelazioni, l'*Atlante delle caratteristiche territoriali primarie delle coste italiane*.
Si tratta di uno strumento di lavoro e di programmazione nato dalle necessità di:

— raccogliere in maniera sintetica tutte le principali informazioni riguardanti il territorio, atte a caratterizzarlo nei suoi molteplici aspetti;

— rilevare per ogni punto della costa i dati territoriali così memorizzati con immediatezza e senza tema di omissioni;

— avere contemporaneamente presenti in maniera visiva i dati di una o più zone della fascia costiera in modo da consentire facilmente dei confronti;

*Studi generali sul territorio.*

— stabilire tutte le correlazioni necessarie per una corretta lettura del territorio.

L'*Atlante* si limita a riportare, in forma grafica, i dati di carattere generale la cui conoscenza sta alla base di qualsiasi scelta di localizzazione, industriale e civile, residenziale, turistica e culturale. Il criterio adottato per la rappresentazione del territorio - la linearizzazione della fascia costiera - costituisce una novità nel genere, che trova una fertile applicazione nel caso specifico dell'Italia, quasi interamente protesa sul mare.
È senz'altro positivo che, nonostante l'esigenza di un continuo aggiornamento dei dati che la integrano, quest'opera sia stata oggetto di una pubblicazione e si trovi ora a disposizione di quanti sono interessati ai problemi relativi al territorio.
L'*Atlante* infatti va inteso non tanto come un'opera divulgativa, quanto come un possibile strumento di lavoro nelle mani degli interessati.



**CARATTERI PRIMARI DEL TERRITORIO**

Sono le categorie dei dati conoscitivi del territorio che vengono presi in considerazione ogni qual volta si debba avviare uno studio specifico di localizzazione e, più in generale, possono essere considerati come l'elemento base del processo di pianificazione del territorio. *

**1. ASSETTO ATTUALE DEL TERRITORIO**

SUDDIVISIONE AMMINISTRATIVA
CARATTERI TOPOGRAFICI PLANOALTIMETRICI E BATIMETRICI
UTILIZZAZIONE DEL SUOLO
INFRASTRUTTURE
SISMICITA'
IDROGRAFIA

**2. PIANIFICAZIONE DEL TERRITORIO**

PARCHI E RISERVE NATURALI PROPOSTI, AREE NATURALI DA PROTEGGERE
PIANI TERRITORIALI DI COORDINAMENTO REGIONALI E SETTORIALI
STRUMENTI URBANISTICI COMUNALI (PIANI REGOLATORI, PROGRAMMI DI FABBRICAZIONE)
VINCOLI
- PAESISTICI
- ARCHEOLOGICI E MONUMENTALI
- MILITARI
- AEROPORTUALI
- IDROGEOLOGICI

**3. CARATTERI DEMOGRAFICI**

POPOLAZIONE RESIDENTE
DINAMICA DEMOGRAFICA
FLUTTUAZIONI STAGIONALI DELLA POPOLAZIONE

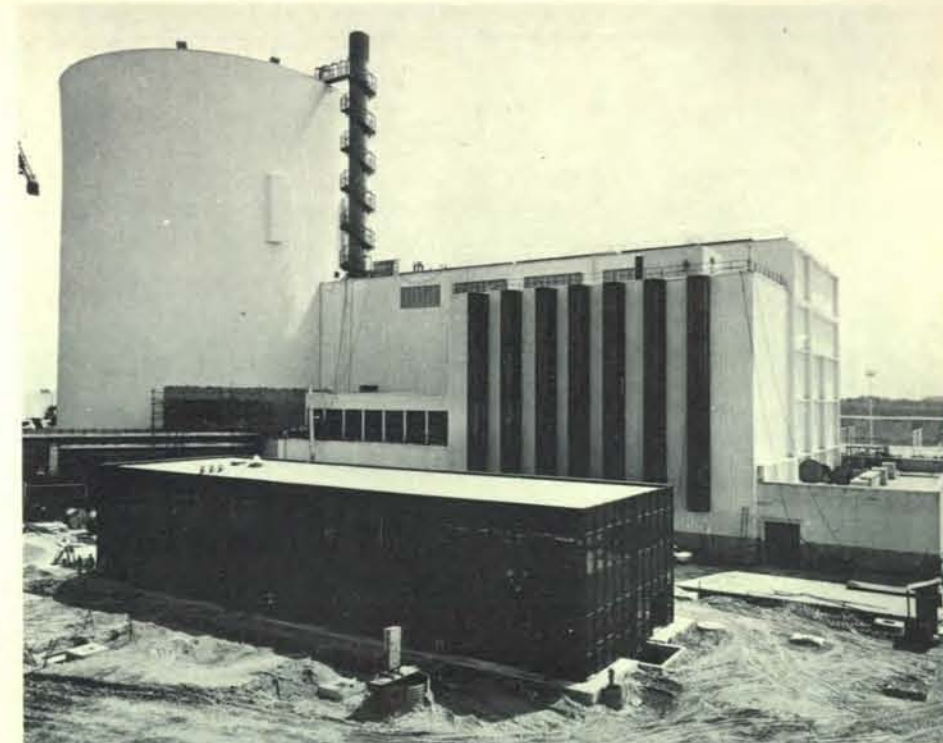
**4. INDICI DI SVILUPPO**

INDICI DI SVILUPPO AGRICOLO
INDICI DI SVILUPPO INDUSTRIALE
INDICI DI SVILUPPO TURISTICO

(*) In relazione all'attuale pianificazione del territorio, nell'*Atlante* si fa riferimento solo alla pianificazione operata dalla Cassa del Mezzogiorno per l'industria e per il turismo (aree di sviluppo industriale, nuclei di industrializzazione, agglomerati industriali, comprensori di sviluppo turistico, ecc.).

La sua utilità è stata ulteriormente posta in rilievo da un recente atto del Parlamento: la legge 2 agosto 1975, n. 393 che detta norme sulla localizzazione delle centrali elettronucleari e sulla produzione e impiego di energia elettrica.
Le responsabilità e i compiti attribuiti da questa legge non solo agli organi tecnici quali l'ENEL e il CNEN, ma anche agli organi amministrativi quali le Regioni e i Comuni, richiedono infatti un approccio capace di integrare le richieste politiche delle autonomie locali con il metodo dell'indagine sistematica e con i dati della complessa realtà degli insediamenti territoriali.
Naturalmente non deve essere perso di vista il valore essenzialmente tecnico di questa e di analoghe iniziative: esse non intendono determinare le scelte che presiedono all'intervento sul territorio, e che sono di natura essenzialmente politica, ma possono certo fornire ai soggetti di tali scelte un quadro sintetico e lineare di una realtà estremamente complessa sulla quale sono destinate ad incidere.
È apparsa chiara, nel corso del dibattito culturale di questi ultimi anni, la carenza degli strumenti legislativi di base per un organico intervento sul territorio, a cominciare dalla insufficienza della legge urbanistica del 1942, travolta dalla complessità dei problemi suscitati in questo campo dallo sviluppo economico e sociale del dopoguerra.
La pianificazione territoriale a livello locale, ad esempio, sarebbe oggi da considerare per buona parte attuata in base ai dati della elaborazione degli strumenti urbanistici comunali. Ma se guardiamo alla pianificazione tenendo conto dei problemi degli insediamenti industriali e delle grandi infrastrutture, il quadro urbanistico appare largamente incompleto. Gli strumenti urbanistici comunali, infatti, non sono certo in grado di prevedere ad esempio, nel loro ambito di intervento, attività siderurgiche, petrolchimiche o di produzione di energia elettrica.
Il problema della localizzazione della grande industria rimane quindi allo stato attuale ancora irrisolto dalla vigente pianificazione territoriale. D'altra parte, anche se è ben vero che la localizzazione degli impianti industriali deve inserirsi nel contesto di una pianificazione generale, non è pensabile che essa possa attendere la soluzione di questo problema generale, senza ripercussioni negative sul processo di sviluppo economico del Paese.
Con l'istituto della "contrattazione programmatica" tra gli organi dello Stato e le grandi imprese si è peraltro cercato di sopperire a questa carenza di pianificazione generale del territorio. Attraverso questo istituto vengono recepiti i piani e gli studi delle imprese e si risolve caso per caso il problema della localizzazione.
L'*Atlante* delle coste italiane nasce, appunto, dall'esigenza di uniformarsi a questo indirizzo, nella consapevolezza che qualsiasi "intervento" sul territorio non può essere che il frutto di una completa e approfondita conoscenza del suo assetto attuale, degli studi su esso condotti, dei vincoli cui è soggetto. L'ENEL ha pertanto intrapreso un vasto programma di indagini, attualmente esteso a tutte le coste dell'Italia peninsulare, con il preciso scopo di costituire un archivio di dati, distinto per regioni, atto a caratterizzare i diversi aspetti del territorio e a cui attingere per definire la localizzazione dei suoi impianti (*si veda la tabella nella pagina precedente*).
Tra i caratteri di base di un territorio va considerato anche il sistema energetico, che non è una semplice infrastruttura, ma è elemento motore di tutte le attività civili industriali.
Il sistema energetico è costituito dalle fonti primarie di energia e dalle attività intese a trasformarle e a renderle disponibili all'utenza. Sono fonti primarie essenzialmente l'energia idraulica, i combustibili fossili e quelli nucleari. Sono fonti secondarie, utilizzabili dal consumatore, i derivati del petrolio e del carbone e l'energia elettrica.
Ogni tipo di insediamento, residenziale o industriale, è caratterizzato, sotto l'aspetto energetico, da parametri che definiscono il tipo, il consumo e la distribuzione nel tempo (potenza) dell'energia.
Nella fase preliminare della pianificazione di un dato territorio, va fatto quindi il rilievo delle caratteristiche del sistema energetico in atto, nonché la sua proiezione nel futuro. Tale lavoro comporta da un lato il bilancio dei consumi in atto e il preventivo dei fabbisogni richiesti dagli insediamenti allo studio, dall'altro il modo di farvi fronte.
A quest'ultimo fine viene fatto in primo luogo un inventario delle risorse energetiche disponibili sul posto e vengono prospettate le possibilità di approvvigionamento dall'esterno; si passa quindi all'esame dei mezzi di trasporto, di trasformazione e di distribuzione. Oltre agli aspetti economici vanno considerati i riflessi territoriali che il sistema energetico comporta, in particolare quelli dovuti all'occupazione del suolo, tutt'altro che trascurabile, da parte delle varie fasi produttive e infrastrutturali del ciclo energetico; basti pensare alle raffinerie, alle centrali elettriche, alle cokerie, ai gasometri, agli oleodotti, alle linee elettriche, ai trasporti stradali e ferroviari. Vanno considerate infine le incidenze sull'ambiente delle suddette installazioni, nonché quelle che si verificano all'atto dell'utilizzazione finale dell'energia.
Nel caso particolare delle fasce costiere italiane, al quale si riferisce l'*Atlante*, il sistema energetico si semplifica notevolmente. Infatti l'entroterra dell'Italia peninsulare è povero, praticamente privo, di risorse energetiche, se prescindiamo da alcuni sistemi idroelettrici nonché da alcuni modesti giacimenti di combustibili fossili già utilizzati. Ogni altro fabbisogno viene coperto con importazioni effettuate essenzialmente via mare.
Nel presupposto che il combustibile arrivi dal mare e che venga utilizzato in un entroterra di limitata profondità, con gli insediamenti concentrati



*Una veduta recentissima della centrale elettronucleare di Caorso (Piacenza) dell'ENEL (potenza di 840 MWe). Si tratta di uno degli ultimi impianti termici che hanno potuto essere realizzati sulle rive di un fiume in Italia. In considerazione della necessità di prelievo di acque di raffreddamento dall'ambiente naturale e della loro reimmissione nelle acque geografiche a temperatura leggermente superiore, le future centrali italiane saranno realizzate sulle coste del mare per poter disporre di acqua di raffreddamento senza problemi di interazione con l'ambiente.*

precipuamente lungo le coste, la configurazione del sistema energetico risulta delineata.
La scelta delle fonti primarie dipende da molti fattori, tra cui principale il mercato internazionale; i punti di sbarco coincidono per quanto possibile con i porti; gli impianti di conversione (raffinerie, cokerie e centrali elettriche) vanno preferibilmente dislocati il più vicino possibile ai punti di sbarco e lungo la costa; quest'ultima esigenza vale in particolare per le centrali termoelettriche tradizionali e nucleari che necessitano di ingenti quantitativi di acqua per il raffreddamento dei condensatori.
L'individuazione della morfologia delle coste (insenature, altimetrie e batimetrie), l'occupazione del suolo, l'indicazione delle principali vie di comunicazione costiere (strade, ferrovie) e la rete elettrica primaria, sono dati sufficienti per definire il sistema al fine dei suoi futuri sviluppi.
Tali dati già figurano tra quelli classificati come primari e riportati nell'*Atlante* costiero dell'ENEL.
È interessante notare che i possibili punti di strozzamento, rispetto all'incremento delle disponibilità di energia secondaria da immettere al consumo, sono costituiti dalla limitata capacità degli impianti di trasporto e di trasformazione, per ovviare alla quale occorre procedere tempestivamente all'installazione di impianti nuovi.
Poiché d'altra parte l'installazione di questi ultimi può interferire con gli stessi insediamenti che si vuole servire nonché l'ambiente, è giocoforza ricercare una soluzione di compromesso su di un piano generale.
In definitiva lo sviluppo del territorio è condizionato dal sistema energetico, il quale a sua volta è condizionato dallo stesso territorio che deve servire. Il modo migliore per tener conto di questo mutuo condizionamento è quello di affrontare il problema globalmente ricorrendo all'approccio sistemistico di cui già si è parlato.
Questa conclusione costituisce una conferma della validità dello studio del territorio intrapreso dall'ENEL, il quale, nell'affrontare un problema specifico, l'installazione delle centrali elettriche, che fanno parte del sistema energetico, ha dovuto ricorrere a un'impostazione generale che investe ogni tipo di insediamento.
La localizzazione di nuove centrali elettriche rientra tra i primi compiti di una pianificazione generale. Con ciò non si vuol dire che tali impianti godano di privilegi e di priorità nell'occupazione di una località rispetto ad altri insediamenti, ma semplicemente che la loro ubicazione deve essere determinata tempestivamente poiché essa condiziona altri insediamenti.
In termini più generali una politica di pianificazione territoriale deve essere preceduta da una verifica del sistema energetico e delle sue capacità di potenziamento e in primo luogo della possibilità di installare nuovi impianti di produzione di energia elettrica.

*Alberto Cressi*

# La microstruttura dei materiali polimerici

*I progressi nella produzione di polimeri sintetici dipenderanno sia da una migliore conoscenza della loro complessità chimica, sia dalla realizzazione di tecniche più raffinate per controllare il loro ordinamento molecolare*

di D. R. Uhlmann e A. G. Kolbeck

I materiali possono essere distinti in metallici, ceramici o polimerici, o compositi di questi tre. Le prime due classi comprendono materiali che hanno avuto importanza tecnologica fin dai tempi dei primi vasai e fabbri ferrai. La fabbricazione di oggetti di metallo o di ceramica utilizzava materie prime tratte dal suolo come sabbia, pietre calcaree, minerali metalliferi o finanche un meteorite rinvenuto occasionalmente. Il materiale grezzo veniva trasformato in prodotti finiti mediante processi comprendenti trasformazioni chimiche e fisiche, spesso ottenute ad alte temperature.

L'utilizzazione di polimeri prima del XX secolo era sostanzialmente limitata a quelli che ora chiamiamo polimeri naturali. Per questi, gli stadi più critici della trasformazione delle materie prime (acqua, ossigeno, anidride carbonica e taluni minerali) in materiali finiti come il legno, il cuoio, la lana e il cotone sono costituiti da processi biologici difficilmente controllabili. Il ruolo dell'artigiano, o del tecnologo, nel trattare questi materiali era limitato a operazioni di finissaggio come la concia del cuoio e la tessitura delle fibre tessili. È soltanto in questo secolo che gli scienziati hanno sviluppato una dettagliata conoscenza della struttura e delle proprietà dei polimeri, impadronendosi delle tecniche per produrre polimeri sintetici. Tali nuove conoscenze hanno portato allo sviluppo di un'industria dei polimeri con una produzione annuale attuale di circa 13 milioni di tonnellate di materiale sintetico nei soli Stati Uniti.

La maggior parte degli sviluppi dei polimeri sintetici negli ultimi quattro decenni è stata dominata dal lavoro di comprensione e controllo della chimica del materiale. I chimici macromolecolari hanno ottenuto successi eccezionali nell'arte di precostituire l'architettura molecolare così da produrre desiderate proprietà. Sembra evidente, tuttavia, che in futuro gli sviluppi in questo campo deriveranno da un'accresciuta confidenza nella possibilità di variare la microstruttura dei materiali polimerici per ottenere variazioni nelle proprietà.

Qui descriveremo alcuni degli aspetti microstrutturali più importanti dei polimeri sintetici e spiegheremo alcune delle relazioni che si sono stabilite fra la microstruttura di questi materiali e le loro proprietà. Particolare rilievo sarà dato alle proprietà meccaniche, dal momento che queste sono state studiate più a fondo. Ci si attende, tuttavia, che nei prossimi decenni altre proprietà dei materiali polimerici, come le proprietà elettriche e ottiche, attireranno una attenzione sempre crescente. Cambiamenti microstrutturali possono avere un profondo effetto anche su tali proprietà.

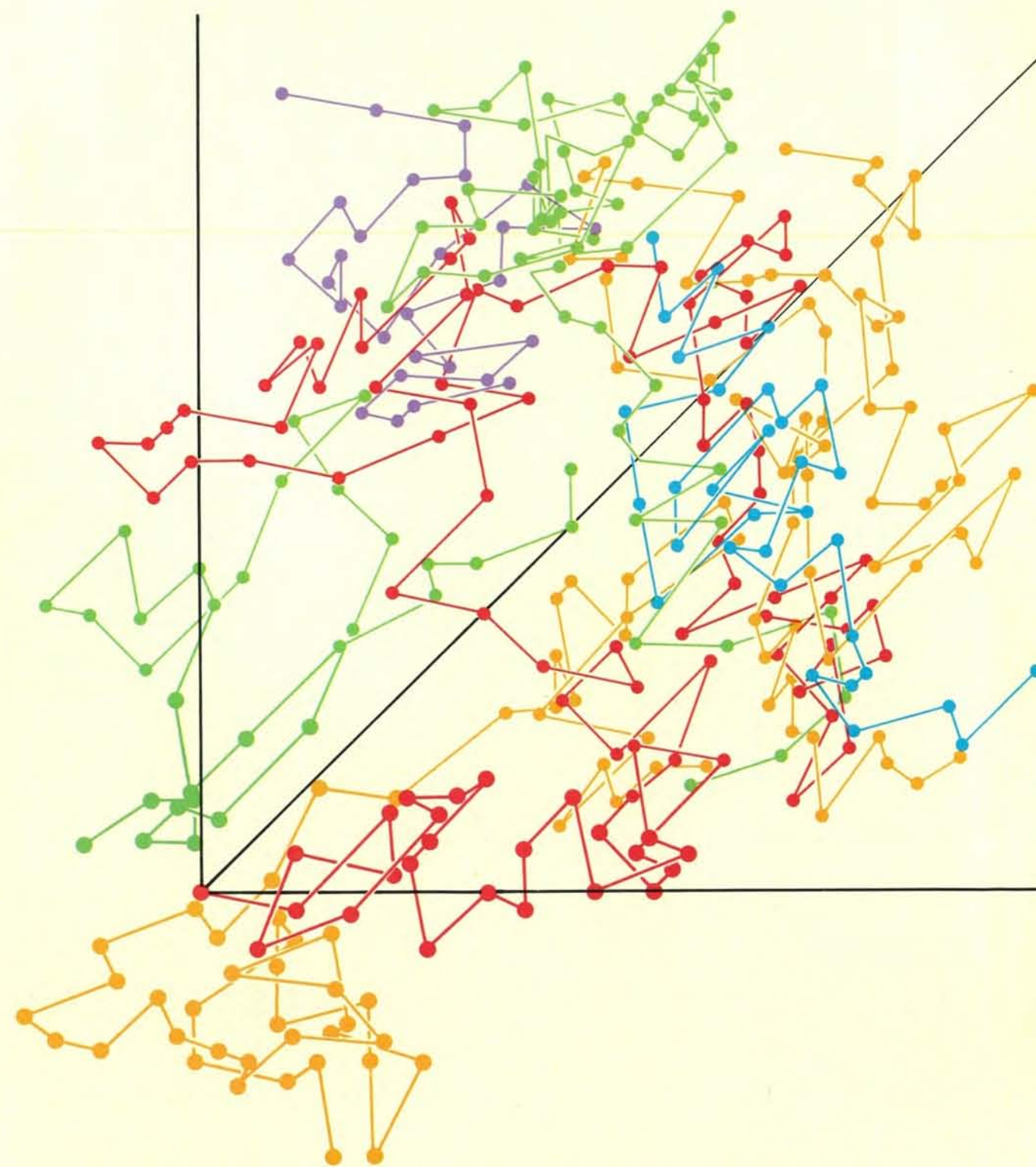
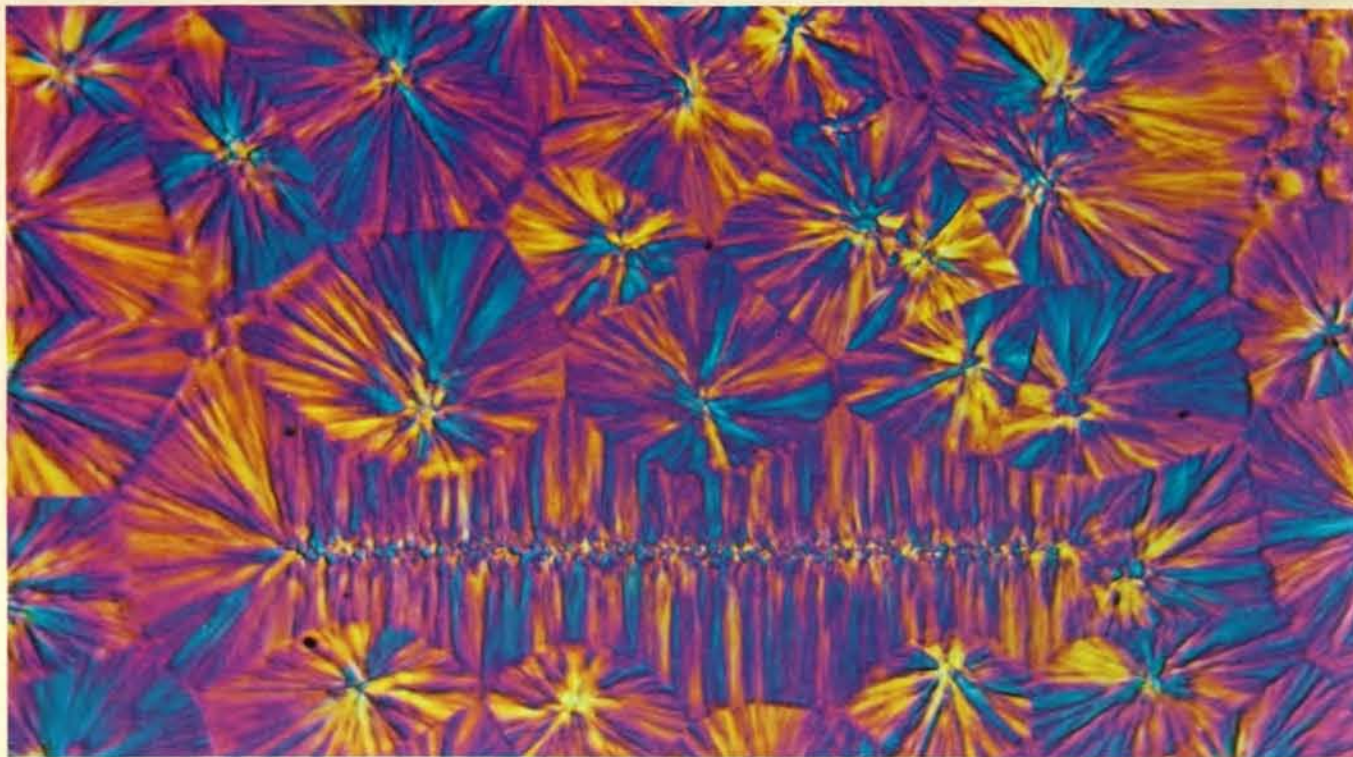
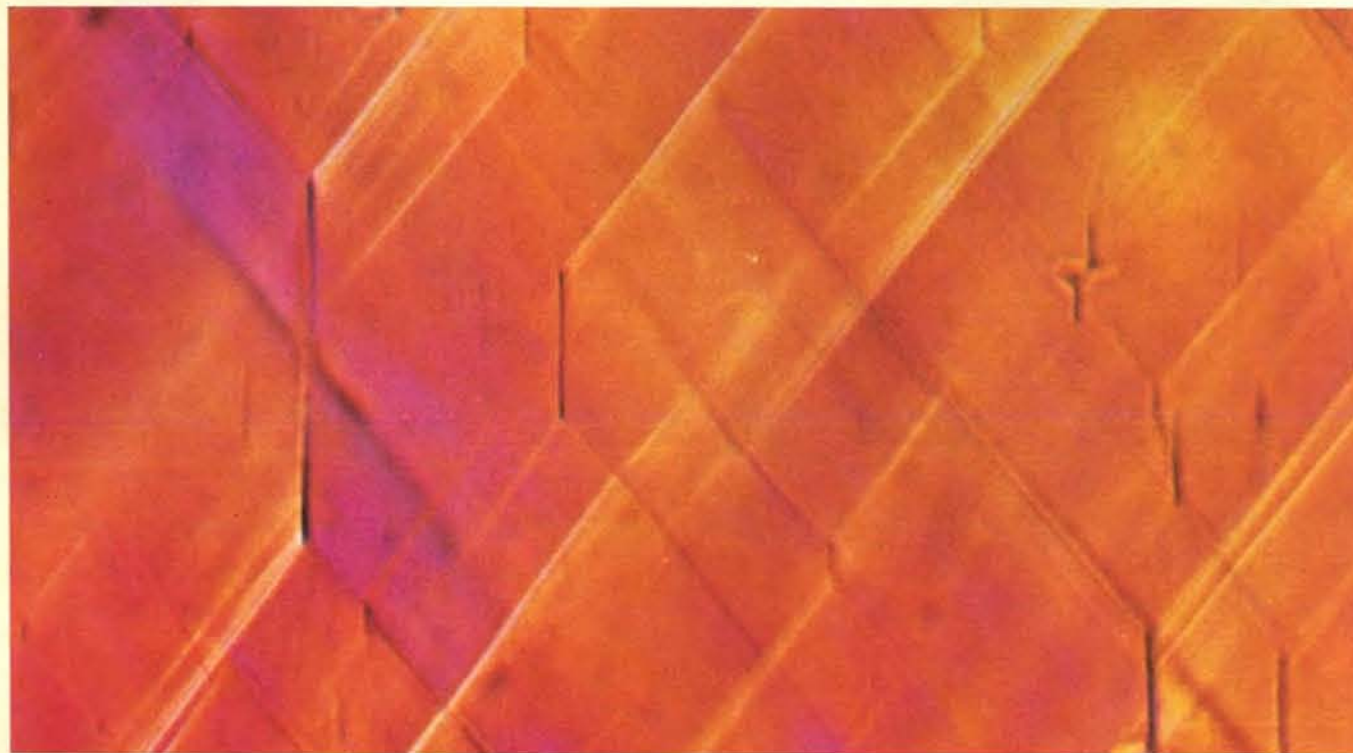
Noi ci occuperemo esclusivamente dei polimeri termoplastici, che sono caratterizzati dall'assenza di estese reticolazioni fra le lunghe catene delle molecole polimeriche. A differenza dei polimeri termoindurenti, i polimeri termoplastici possono fondere ed essere riforgiati fornendo calore, ed è in questi materiali che sono più pronunciati gli effetti di variazioni microstrutturali sulle proprietà. Fra i polimeri termoplastici più familiari ricordiamo il polietilene, il polipropilene, il polivinilcloruro, il polistirene, il polimetilmetacrilato, il policarbonato e il nylon, per non citarne che alcuni.

I polimeri termoplastici possono essere divisi in due classi: amorfi e semicristallini. Taluni polimeri non posseggono una regolarità chimica sufficiente affinché le molecole possano impacchettarsi secondo una disposizione regolare. Tali polimeri, che comprendono il polistirene e il polimetilmetacrilato comuni, non possono pertanto cristallizzare in misura apprezzabile; quando vengono raffreddati a partire dallo stato fuso, essi formano dei solidi amorfi, o vetri. Solidi vetrosi possono formarsi anche da polimeri come il policarbonato e il polietilene tereftalato (il comune poliestere), che hanno sufficiente regolarità chimica da permettere la cristallizzazione, ma che cristallizzano così lentamente che un raffreddamento moderatamente rapido da temperature al di sopra del punto di fusione dà luogo a materiali solidi amorfi.

Una volta ottenuti nello stato vetroso, i polimeri cristallizzabili e i polimeri non cristallizzabili presentano aspetti microstrutturali simili. Il modello più accreditato per la microstruttura della maggior parte dei polimeri amorfi non orientati è quello di un serpentino attorcigliato su se stesso in modo casuale (*si veda la figura nella pagina a fronte*). Questo modello, derivato da una rappresentazione statistica delle molecole viste come catene flessibili, poggia sull'assunto che la relazione fra due legami della catena separati da più unità lungo la catena stessa sia essenzialmente casuale.

Il modello di serpentino attorcigliato casualmente prevede che ogni molecola a catena lunga assuma la forma di un gomitolo piuttosto sfatto, con un diametro che aumenta come la radice quadrata del numero di segmenti della molecola. Lo spazio libero all'interno di ogni gomitolo è occupato da molecole contigue, e ci si possono attendere diversi gradi di aggrovigliamento e di intreccio non solo fra segmenti di molecole diverse, ma anche fra segmenti di una stessa molecola. In termini non rigorosi ma espressivi, la struttura a gomitolo statistico può essere descritta come simile a una massa di spaghetti agitata e molto aggrovigliata.

Sono state proposte diverse alternative al modello di gomitolo statistico per i polimeri amorfi. Da rilevare in particolare è l'ipotesi, basata sull'osservazione di eterogeneità microscopiche in diversi polimeri vetrosi, che i materiali contengano zone localizzate altamente ordinate. Il grado di ordine suggerito è intermedio fra quello di una struttura a gomitolo statistico e quello che ci si attende da una struttura cristallina. I risultati di vari studi, condotti con tecniche come la diffusione di neutroni a basso angolo e la diffrazione di raggi X a basso angolo, indicano che le eterogeneità viste al microscopio elettronico probabilmente non sono caratteristiche della massa del polimero; pertanto il modello di gomitolo statistico resta in generale il preferito per rappresentare la struttura dei polimeri amorfi. Invece, si ritiene che le eterogeneità osservate costituiscano aspetti potenzialmente importanti delle superfici dei materiali, e il loro studio può fornire preziose informazioni sulle proprietà specifiche delle superfici.

Se i polimeri vetrosi sono formati in condizioni di quiete (cioè in assenza di qualunque causa di orientamento, come

**Il modello a gomitolo statistico della microstruttura di un polimero amorfo prevede che in assenza di influenza esterna ogni molecola a catena lunga si attorcigli a forma di gomitolo, intrecciato con segmenti di molecole contigue. In questo schema, basato su un disegno generato da un calcolatore, il grado di polimerizzazione (il numero di legami in ogni catena colorata) è caratteristico di polimeri comuni come nylon e poliestere. Nel diagramma le catene occupano meno del 10 per cento del volume disponibile; in un polimero reale lo spazio sarebbe riempito quasi interamente, con un'apparenza molto più aggrovigliata.**

Caratteristiche microstrutturali osservate in polimeri semicristallini sono visibili in questa fotografia al microscopio di un film sottile di polipropilene. Le strutture a « sprazzo di sole » sono dette *sferuliti*; i loro contorni sarebbero circolari se non incontrassero i cristalliti circostanti, quando si sviluppano in fuori dal nucleo centrale. Si dice che la formazione lineare ha una struttura nucleata linearmente; in questo caso i cristalliti lamellari si sono sviluppati in fuori da un sito di nucleazione allungato. La fotografia è stata presa in luce polarizzata da D. Hamer alla Celanese Research Co.; l'ingrandimento è di circa 400 volte.

Bande di scorrimento e *crazes*, due tipi di deformazione locale osservati in polimeri vetrosi rigidi sotto sforzo, sono visibili in questa microfotografia di un campione di polivinilcloruro. Il campione è stato tirato circa del 10 per cento in direzione orizzontale. I *crazes* appaiono come righe nere perpendicolari alla direzione di trazione; le bande di scorrimento sono le strisce oblique chiare orientate a circa 45 gradi rispetto alla direzione dello sforzo applicato. In generale la formazione di tali disomogeneità di struttura accresce la tenacità di un materiale polimerico amorfo, in quanto occorre dissipare energia per allineare le catene nelle regioni deformate. L'ingrandimento di questa fotografia al microscopio, presa dagli autori, è di circa 570 volte.

lo stiramento), le loro proprietà macroscopiche, o di massa, risultano isotropiche: le medesime in ogni direzione. Trattandosi di catene lunghe, tuttavia, le molecole di polimero di per se stesse risultano intrinsecamente anisotropiche: le loro proprietà lungo la catena sono differenti dalle loro proprietà in direzioni ortogonali a essa. Ne deriva la possibilità di produrre materiali polimerici che presentino comportamento anisotropico su scala macroscopica, adottando condizioni di lavorazione che portano a un allineamento preferenziale delle catene molecolari parallelamente a una o più direzioni esterne. Il grado di allineamento molecolare, e quindi di anisotropia di massa, può essere determinato sperimentalmente misurando proprietà sensibili all'orientamento, come l'indice di rifrazione, in varie direzioni nel materiale. La forma e il grado di orientamento molecolare giocano un ruolo fondamentale nel determinare le proprietà meccaniche di questi materiali.

Nei polimeri semicristallini si possono osservare due tipi di microstruttura, a seconda di come si allineano le molecole durante il processo di cristallizzazione (*si veda la figura in alto nella pagina a fronte*). La microstruttura a sferuliti, o «sprazzi di sole», è normalmente il risultato di una cristallizzazione in condizioni di quiete, mentre la microstruttura con nucleazione lineare, o *shish kebab*, risulta da cristallizzazione in condizioni di flusso, in cui le catene si orientano parallelamente le une alle altre. In entrambi i casi l'unità microstrutturale di base sembra essere un cristallita lamellare. Questi cristalli sono allineati radialmente negli sferuliti e perpendicolarmente alla direzione del flusso nelle strutture nucleate linearmente.

Monocristalli lamellari isolati possono venir prodotti precipitando il polimero da una soluzione diluita. In tali monocristalli le molecole sono allineate lungo la direzione della dimensione più sottile della lamella. Poiché la lunghezza delle molecole stese è generalmente diverse volte più grande dello spessore delle lamelle, si è dedotto che le molecole devono piegarsi sulle superfici delle lamelle per rientrare in punti diversi. È ancora controverso quanto strette e regolari siano le ripiegature, e si sono proposte diverse possibili configurazioni delle lamelle (*si veda la figura in questa pagina*).

I monocristalli formati a partire da soluzioni diluite presentano una densità minore di quanto ci si aspetterebbe per dei cristalli perfetti degli stessi polimeri, il che fa pensare che parte del materiale non sia disposto secondo un assetto cristallino regolare. Questa frazione amorfa è presumibilmente concentrata alle superfici, dove le molecole si ripiegano. Nei polimeri in massa la differenza fra le densità misurate e le densità dei materiali perfettamente cristallini è ancora più grande; perciò i polimeri in massa vengono più propriamente descritti come semicristallini. Valori tipici della percentuale in volume di cristalli in alcuni polimeri semicristallini sono: 75 per cento nel polietilene ad alta densità; 50 per cento nel polietilene a bassa densità, nel polipropilene e nel nylon.

Diverse configurazioni sono state proposte per la microstruttura dei monocristalli lamellari che si formano precipitando i polimeri da soluzioni diluite. In questi cristalli le molecole sono allineate lungo la dimensione più sottile della lamella. Le catene molecolari presumibilmente si ripiegano alla superficie e rientrano in punti diversi. Qui sono illustrate le tre possibilità. In *a*, talvolta indicato come modello a « quadro di smistamento », le catene rientrano a caso. Nelle altre configurazioni, entrambi modelli a « rientro adiacente », le superfici dove le catene si ripiegano sono lisce (*b*) o ruvide (*c*).

Caratteristiche lamellari sono state osservate in studi al microscopio elettronico di polimeri in massa sia sferulitici, sia nucleati linearmente. Lo spessore delle lamelle e l'orientamento delle catene molecolari nelle lamelle sono in accordo con lo spessore e l'orientamento osservati nei monocristalli formati a partire da soluzioni diluite. Il grado e la natura del ripiegamento delle catene nelle lamelle, e la loro perfezione interna, sono tuttavia sensibilmente diversi nel materiale in massa e nei cristalli formati da soluzioni diluite. Tali differenze riflettono differenze nelle condizioni di cristallizzazione, e in particolare nella concentrazione di segmenti di catena e nella loro competizione verso siti di accrescimento all'interfaccia fra le fasi liquida e solida.

Anche il polimero più semplice, cri-

stallizzato in condizioni di quiete, è un materiale composito molto complesso. Durante il raffreddamento dallo stato fuso i cristalli cominciano a formarsi in centri di nucleazione isolati distribuiti in tutto il materiale. I nuclei si accrescono addizionando le catene, segmento dopo segmento, dal liquido, e il fronte di crescita si suddivide in una schiera sferica di lamelle che emergono radialmente. Quindi la regione centrale di uno sferulita è strutturalmente differente dal resto del materiale. Le lamelle si sviluppano radialmente a partire dalla regione centrale dello sferulita, con le catene entro ciascuna lamella in direzione perpendicolare alla direzione di crescita. Le lamelle spesso si biforcano crescendo; in molti casi esse appaiono torcersi intorno allo sferulita, formando bande concentriche alternate quando esse siano osservate di costa o di piatto (*si veda la figura in questa pagina*).

Oltre alla biforcazione e alla torsione, la crescita degli sferuliti di polimero comporta la segregazione di componenti non polimerici e di componenti polimerici non cristallizzabili nelle zone fra le lamelle. I componenti non polimerici includono stabilizzanti vari, coadiuvanti, additivi ignifughi e residui di catalizzatori di polimerizzazione presenti pressoché in tutti i polimeri commerciali. Particolarmente importanti nel determinare le proprietà meccaniche dei polimeri semicristallini sono i componenti strutturali noti come molecole-legaccio. Sono tratti o fasci di molecole, che si estendono da una lamella all'altra, che possono convogliare e ridistribuire gli sforzi in tutto il materiale. La microstruttura dei polimeri sferulitici è poi interessata dal fenomeno non trascurabile della cristallizzazione secondaria: l'ulteriore sviluppo e modificazione di cristallinità che ha luogo quando uno sferulita in crescita ne incontra un altro.

Quando un polimero cristallizza in condizioni di flusso, l'allineamento dei segmenti di catena provocato dal flusso porta a una microstruttura cristallina non sferulitica (*si veda la figura in alto nella pagina a fronte*). L'allineamento delle catene nel campo di flusso determina la formazione di cristalli allungati pure allineati nella direzione del flusso. Questi cristalli sono molto più lunghi dello spessore delle lamelle, ma generalmente non rappresentano molecole completamente stese. Tali cristalli allungati (o compositi cristallino-amorfi allungati) possono costituire il 5 per cento o anche meno del polimero. Essi, tuttavia, hanno l'effetto di servire come siti di nucleazione per la cristallizzazione del resto del materiale, e l'orientamento di questi cristalli allungati, o «nuclei lineari», controlla l'orientamento delle lamelle che si formano in seguito. Precisamente le lamelle si sviluppano a partire dai nuclei lineari in fuori, con le direzioni di crescita perpendicolari alla direzione del flusso. Se il grado di allineamento prima o durante la cristallizzazione è sufficientemente alto, le lamelle non presentano la torsione radiale caratteristica della cristallizzazione sferulitica e della cristallizzazione in condizioni di flusso sotto bassi sforzi di scorrimento. In condizioni di flusso sotto sforzi elevati, la microstruttura consiste essenzialmente di lamelle piane allineate perpendicolarmente alla direzione del flusso, con l'orientamento delle catene nelle lamelle strettamente parallelo alla direzione del flusso.

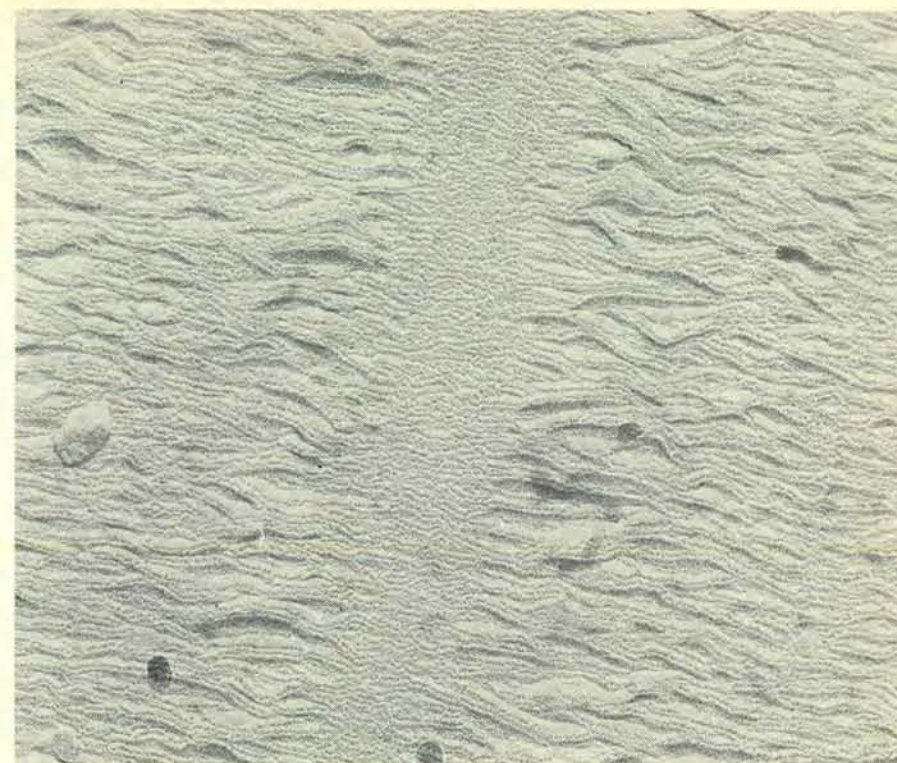
Quando soluzioni diluite di polimeri vengono agitate durante la cristallizzazione, ne risultano strutture *shish kebab* (*si veda la figura in basso nella pagina a fronte*). Queste strutture sono per certi versi simili alle strutture nucleate linearmente nei polimeri in massa cristallizzati in condizioni di flusso: quelli che possiamo chiamare *shishes* corrispondono ai cristalli allungati della struttura a nuclei lineari, i *kebabs* corrispondono alle lamelle. Come per le microstrutture sferulitiche, le microstrutture nucleate linearmente risultano complicate da altri fattori, come le molecole-legaccio, i componenti non cristallizzabili e vari additivi.

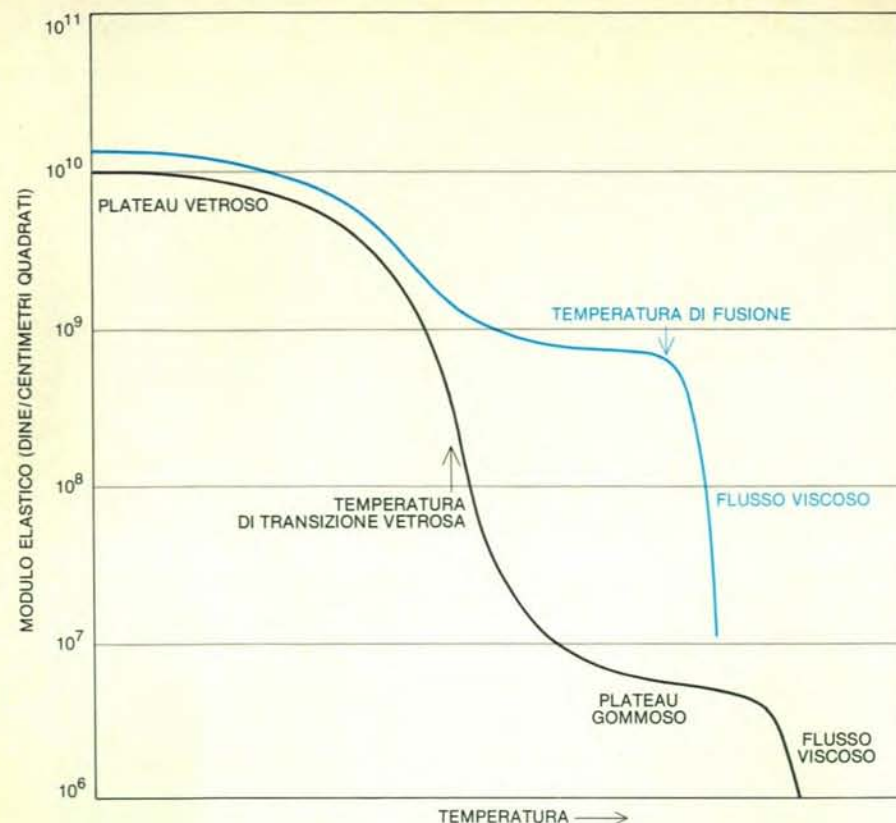
Veduta tridimensionale di uno sferulita polimerico in questa microfotografia elettronica a scansione di un campione di polietilene ad alta densità attaccato con xilolo. Le bande concentriche corrispondono alla torsione dei cristalliti a nastro, con le lamelle viste di costa e poi di piatto in successivi anelli. La cristallizzazione iniziò in un sito di nucleazione all'interno della struttura gibbosa, al centro. Durante la crescita del cristallo, il fronte di crescita si suddivise in una schiera sferica di lamelle emergenti radialmente, che iniziarono a torcersi intorno ai raggi dello sferulita, formando le bande concentriche. La microfotografia è opera degli autori; l'ingrandimento è di 2800 volte.

In sintesi, sia i polimeri sferulitici, sia quelli nucleati linearmente sono dei compositi piuttosto complessi di materiale cristallino e non cristallino, la cui microstruttura dipende fortemente sia dalla natura chimica, sia dalla storia del processo di produzione. Le proprietà dei polimeri possono essere variate ampiamente cambiando le caratteristiche microstrutturali.

I polimeri amorfi presentano diversi tipi di comportamento meccanico a seconda della composizione chimica, della distribuzione delle lunghezze delle catene, dell'orientamento molecolare e del grado di ramificazione o di reticolazione. Altri importanti fattori sono la temperatura e la scala dei tempi delle misure sperimentali. La varietà di comportamento meccanico osservabile può essere illustrata considerando la variazione con la temperatura della rigidità di un polimero amorfo tipico (*si veda la figura a pag. 62*). A temperature al di sotto della temperatura di transizione vetrosa (la temperatura a cui il materiale fuso comincia a rapprendersi diventando vetro) i polimeri amorfi hanno un grado di rigidità piuttosto alto, che varia solo lentamente con la temperatura. In questo campo di temperatura il polimero si comporta elasticamente, per piccole deformazioni. Per grandi deformazioni, però, la deformazione diviene permanente. A temperature vicine alla transizione vetrosa la rigidità cambia rapidamente con la temperatura; si dice che il materiale è simile a cuoio. A temperature al di sopra della transizione vetrosa si osserva una seconda regione di rigidità pressoché costante. In questa regione il materiale diventa gommoso e si lascia deformare in modo reversibile. A temperature al di sopra della regione gommosa, infine, il polimero si comporta come un fluido viscoso. Tutti i polimeri amorfi presentano una variazione simile di rigidità con la temperatura; ciò che varia da polimero a polimero sono le temperature a cui avvengono le varie transizioni di comportamento e il grado di rigidità in ciascuna regione di temperatura.

La maggior parte dei polimeri amorfi di importanza commerciale presentano un comportamento vetroso oppure gommoso e la grande differenza di proprietà meccaniche di questi due tipi di polimeri amorfi può essere associata a particolari caratteristiche chimiche e microstrutturali del materiale. Il comportamento gommoso dei polimeri è legato alla caratteristica di catene lunghe. In particolare due fattori sono importanti. Primo, la distanza fra gli estremi della catena nella configurazione a gomitolo statistico è molto minore della lunghezza delle catene completamente stese (il che consente grandi allungamenti). Secondo, lo stato termodinamicamente più stabile è quello della configurazione raggomitolata (il che fornisce la forza di richiamo allo stato originario quando lo sforzo viene rimosso). La forza richiesta per tendere una gomma (cioè, per allungare le molecole inizialmente raggomitolate) è associata essenzialmente al fatto che l'entropia nello stato raggomitolato è molto maggiore dell'entropia nello stato steso.

Fra i polimeri che presentano comportamento gommoso a temperatura ambiente figurano il poliisoprene (gomma naturale) e il polibutadiene (una gomma sintetica). In pratica è necessario aggiungere dei legami chimici trasversali ai polimeri gommosi per eliminare il flusso viscoso e ottenere una deformabilità completamente reversibile. La maggior parte dei polimeri termoplastici diventa gommosa a temperature al di sopra della transizione vetrosa, ma quando questa si trova a temperature ben superiori alla temperatura ambiente il comportamento gommoso è di scarso interesse tecnologico. Inoltre, altri fattori possono essere importanti nel determinare l'utilità tecnologica di una gomma, fra cui la resistenza all'abrasione, la tendenza alla cristallizzazione, l'inerzia chimica e l'idoneità al rinforzo con «cariche»: sostanze aggiunte alla maggior parte delle gomme commerciali per migliorarne le proprietà meccaniche. La carica più comune

La microstruttura a nucleazione lineare può risultare dalla cristallizzazione di un polimero in condizioni di flusso. In questa microfotografia elettronica a trasmissione di un calco della superficie di un film di polietilene estruso, l'orientamento primario delle catene molecolari e il cristallo allungato risultante sono allineati con la direzione di flusso (*verso l'alto a destra*). Successivamente si sviluppano cristalliti lamellari dal sito centrale di nucleazione in fuori, perpendicolarmente alla direzione di flusso. L'ingrandimento di questa microfotografia, presa da Ian L. Hay della Celanese, è di 80 000 volte.

Questa microstruttura a *shish kebab*, simile a quella a nucleazione lineare illustrata sopra, si è formata cristallizzando polietilene in una soluzione di xilolo. In questa fotografia al microscopio elettronico a trasmissione, opera di R. B. Williamson dell'Università di California a Berkeley, si vedono il cristallo del nucleo centrale e i cristalliti lamellari che si sviluppano ad angolo retto. L'ingrandimento è di circa 1700 volte.

Variazione della rigidità con la temperatura per un tipico polimero amorfo (*linea in nero*) e un tipico polimero semicristallino (*linea in colore*). La forma delle due curve è una caratteristica generale di un'ampia gamma di polimeri chimicamente differenti.

è il nerofumo, che spesso costituisce il 20-25 per cento del volume del materiale.

A temperature al di sotto della transizione vetrosa i moti dei segmenti di catena incontrano barriere di energia notevoli e non si osserva comportamento gommoso. Invece si manifestano caratteristiche fragili o di tipo tenace-duttile. I polimeri fragili, come il polistirene e il polimetilmetacrilato a temperatura ambiente, si fratturano a deformazioni molto più piccole di quelle che si possono imporre ai polimeri gommosi. In generale tali polimeri a temperature al di sotto della transizione vetrosa sono più rigidi che nello stato gommoso e per una data deformazione richiedono tensioni più alte.

I polimeri gommosi si deformano in generale in modo uniforme, per cui la deformazione locale in ogni punto del materiale è paragonabile alla deformazione totale del pezzo. Molti polimeri rigidi, al contrario, si deformano in modo non uniforme, sviluppando zone in cui le deformazioni locali sono molto maggiori della deformazione media del pezzo. Nei polimeri vetrosi si osservano due tipi di disuniformità di deformazione, i *crazes* e le bande di scorrimento (*si veda la figura in basso a pag. 56*).

I *crazes* sono zone localizzate, orientate perpendicolarmente alla direzione di sollecitazione, caratterizzate da larghe deformazioni rispetto alle regioni contigue. Le grandi deformazioni di tali zone portano a un allineamento delle catene molecolari parallelo alla direzione di sollecitazione. Le catene orientate si raggruppano in fasci separati tra loro da un dedalo di vuoti interconnessi. I *crazes* diffondono la luce e sono visibili a occhio nudo come piani sbiancati perpendicolari alla direzione di sollecitazione.

Le bande di scorrimento sono zone localizzate di deformazione con un'angolazione di circa 45 gradi rispetto alla direzione di sollecitazione. Entro queste bande vi è un elevato grado di orientamento delle catene. Benché la deformazione di bande di scorrimento non sia generalmente accompagnata dalla formazione di vuoti, le bande sono facilmente visibili a causa delle differenze di indice di rifrazione fra il materiale orientato all'interno delle bande e il materiale non orientato al di fuori di esse.

La formazione di *crazes* e di bande di scorrimento rappresenta processi energeticamente dissipativi e ogni aumento di dissipazione di energia corrisponde a un aumento di tenacità del materiale. Quando si sollecitano i polimeri amorfi, essi per lo più mostrano solo pochi *crazes* e bande di scorrimento prima della frattura; tali polimeri sono affatto fragili. Se la microstruttura del polimero viene però modificata in modo tale da facilitare la formazione di *crazes* e di bande di scorrimento, il polimero può essere reso più tenace. Per produrre polimeri vetrosi con maggiore tenacità, si possono addizionare ai materiali particelle di gomma in quantità e dimensioni controllate. Il materiale consiste allora di inclusioni gommose in una matrice vetrosa. Le superfici delle particelle di gomma servono come siti di concentrazione degli sforzi, dove lo sforzo locale supera quello richiesto per la formazione di *crazes* e/o bande di scorrimento. I materiali in cui una formazione estesa di *crazes* e di bande di scorrimento predomina sulla frattura macroscopica sono caratterizzati da una tenacità molto più elevata. Un esempio di polimero vetroso modificato con gomma è il polistirene antiurto.

La fragilità dei polimeri vetrosi può essere alterata significativamente anche impartendo un orientamento al materiale, facendolo fluire a temperature al di sopra della transizione vetrosa e poi «congelando» l'orientamento per raffreddamento. Un esempio di questa classe di polimeri è il polistirene stirato a caldo: esso si lascia allungare parecchio nella direzione dello stiro a caldo prima di rompersi, in contrasto con il comportamento fragile del polistirene ordinario.

Il secondo gruppo di polimeri vetrosi, di cui sono esempio il policarbonato e il polietilene tereftalato amorfo, è caratterizzato da un alto grado di elasticità (confrontabile con quello dei polimeri vetrosi fragili) e dalla capacità di allungarsi considerevolmente sotto tensione prima di fratturarsi (paragonabile alla capacità di allungamento di alcuni polimeri gommosi). Quando si sottopongono a stiramento polimeri di questo tipo, il diagramma della relazione sforzo-deformazione presenta una zona elastica a piccole deformazioni e poi una zona di snervamento. Il diagramma presenta poi una zona di continuo allungamento del provino a uno sforzo pressoché costante e questa zona si estende fino al punto di rottura (*si veda la figura a pagina 64*).

Lo snervamento di un provino di polimero sotto stiro è di solito accompagnato dalla formazione di una zona di strizione («collo») con una sezione distintamente minore e un grado di deformazione molto maggiore di quello delle regioni adiacenti del provino. Il processo di snervamento non è uniforme: il collo si forma spesso in una zona di intensa formazione di bande di scorrimento. Lo stiramento del provino procede con la propagazione della zona di strizione verso uno o entrambi gli estremi del provino e questo di solito si frattura quando la strizione ha esaurito l'intero campione. La formazione e la propagazione di una strizione stabile è caratteristica non

solo dei polimeri amorfi, ma anche di molti polimeri semicristallini.

Entro le zone di strizione dei polimeri amorfi le catene molecolari hanno un alto grado di allineamento secondo la direzione in cui viene stirato il materiale. Al di fuori della zona di strizione l'orientamento delle catene differisce solo di poco da quello del materiale di partenza. Il grado di orientamento cambia poco in entrambe le zone durante il processo di stiro; solo nella stretta zona che costituisce le «spalle» della regione di strizione si verifica un'apprezzabile deformazione con riallineamento delle catene.

Il meccanismo secondo cui le catene orientate casualmente all'esterno della regione di strizione si trasformano in catene altamente orientate all'interno del collo non è ancora perfettamente chiarito. In termini qualitativi, la deformazione di una strizione stabile richiede che il polimero sia capace di slittamenti interni e riordinamenti strutturali tali che il riorientamento delle catene avvenga più facilmente della frattura. La struttura chimica del polimero è un fattore importante nel determinare se si osserverà lo snervamento e poi lo stiro, oppure il comportamento fragile. In particolare, larghi gruppi laterali sulle catene polimeriche possono inibire il processo di scorrimento necessario per lo stiro, con il risultato che lo stiramento spesso porta a una frattura fragile. Nei polimeri privi di gruppi laterali decisamente più grossi dell'ingombro laterale della catena, invece, le molecole sotto stiro possono scorrere abbastanza da permettere la formazione di zone di strizione stabili.

Oltre al processo di intenerimento per deformazione (*strain-softening*), che attraverso lo scorrimento localizzato del materiale dà luogo al fenomeno dello snervamento, la formazione di una strizione stabile richiede un meccanismo di irrigidimento per deformazione (*strain-hardening*). In altri termini, allorché inizia la strizione, al diminuire della sezione lo sforzo locale nella sezione ridotta aumenta. Nei metalli la strizione generalmente sfocia nella frattura del provino a causa dell'aumento dello sforzo locale. Nei polimeri l'allineamento delle catene nelle spalle del collo dà un materiale in grado di sopportare meglio lo sforzo applicato, il che si risolve in una stabilizzazione della strizione.

Quando i polimeri vengono stirati sotto carico costante anziché a velocità di deformazione costante, si possono formare diversi colli in diversi tratti del provino ed essi possono propagarsi simultaneamente. Ciò riflette il fatto che sotto carico costante lo snervamento non è accompagnato da una caduta dello sforzo e quindi lo sforzo critico per lo snervamento può essere raggiunto in diversi punti della lunghezza del provino.

Poiché la microstruttura dei polimeri semicristallini è complessa, pure complesse sono le relazioni fra la microstruttura e le proprietà di questi materiali. Per caratterizzare i cambiamenti della componente cristallina della microstruttura durante la deformazione, si può far ricorso a mezzi sperimentali diretti come la diffrazione di raggi X e la microscopia elettronica. Per via della disponibilità di questi mezzi, la maggior parte delle trattazioni sulla microstruttura e le proprietà meccaniche dei polimeri semicristallini sono focalizzate sul comportamento della componente cristallina. I fenomeni che si osservano durante lo stiro a freddo, però, sono strettamente simili sotto molti aspetti per entrambi i tipi di polimeri, amorfi e semicristallini. La caratteristica di questi materiali di essere costituiti da lunghe molecole a catena ha un'influenza determinante sul loro comportamento a deformazione, e il considerare solo la componente cristallina non permette di spiegare completamente le proprietà meccaniche dei polimeri semicristallini.

I polimeri cristallizzati sferuliticamente mostrano due tipi di comportamento meccanico, a seconda che la frazione amorfa del materiale si trovi al di sopra o al di sotto della sua temperatura di transizione vetrosa. Se si trova al di sotto della transizione vetrosa, il materiale è caratterizzato da un grado di rigidità simile, ma leggermente più alto di quello del polimero equivalente completamente vetroso; un materiale così si comporta in maniera tipicamente fragile. Sia il polietilene tereftalato, sia il policarbonato possono essere cristallizzati in forma sferulitica con la componente amorfa nello stato vetroso a temperatura ambiente. Quando vengono deformati, questi polimeri sono estremamente fragili e non sono di alcuna utilità pratica. Nello stato amorfo senza cristallinità ben sviluppata, entrambi questi polimeri possono venire tesi fino a grandi deformazioni senza che si fratturino. La differenza di comportamento riflette la presenza della fase cristallina orientata casualmente, che impedisce il riordinamento strutturale necessario perché il materiale possa subire grandi deformazioni.

Tipiche curve sforzo-deformazione per quattro polimeri amorfi (*linee in nero*) e quattro polimeri semicristallini (*linee in colore*) ottenute provando campioni in trazione a velocità di deformazione costante fino a frattura (*punto finale di ciascuna curva*). Le gomme elastomeriche (*a*) possono essere tirate fino a deformazioni di diverse centinaia per cento e rilasciarsi completamente senza deformazione permanente; alcuni polimeri di questo tipo, come la gomma naturale (poliisoprene), a grandi deformazioni cristallizzano e diventano più forti. Polimeri tenaci-duttili come il policarbonato (*b*) cominciano a subire deformazioni permanenti ad allungamenti del 5-10 per cento formando una zona di strizione in corrispondenza di un massimo di snervamento locale sulla curva sforzo-deformazione; deformazioni a frattura dell'ordine di 50-200 per cento sono tipiche di questi polimeri. Polimeri fragili come il polistirene non orientato (*c*) in generale si fratturano a sforzi più grandi ma a deformazioni di circa il 5 per cento soltanto. Il polistirene preorientato per stiramento a caldo a temperature al di sopra della sua temperatura di transizione vetrosa (*d*) può essere tirato fino ad allungamenti molto maggiori del polistirene non orientato. Polimeri sferulitici cristallizzati dal fuso come il polietilene ad alta densità (*e*) sono pure caratterizzati dalla formazione di una strizione in corrispondenza di un massimo sulla curva, dopo di che possono allungarsi notevolmente a un livello dello sforzo pressoché costante. I polimeri semicristallini orientati in una direzione, come le fibre (*f*), tipicamente presentano sforzi di frattura alti per piccoli allungamenti. I film semicristallini orientati in due direzioni (*g*) hanno curve sforzo-deformazione intermedie fra quelle dei materiali sferulitici e dei materiali fibrosi. Infine, anche i materiali elastici-duri (*h*) mostrano alti sforzi di snervamento e grandi allungamenti, ma le deformazioni sono in larga misura reuperabili.



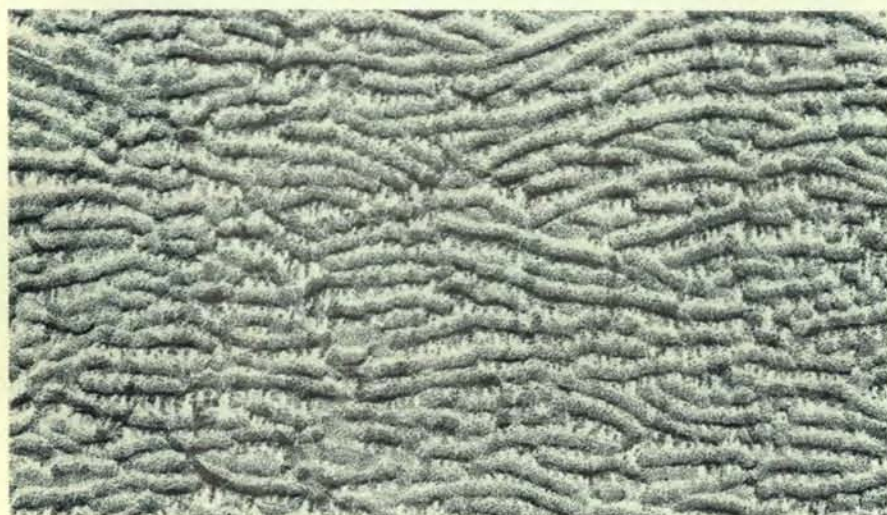
L'effetto della ricottura di un film di polipropilene elastico-duro sotto tensione è evidente in questa fotografia al microscopio elettronico, che mostra la struttura vista nella illustrazione in basso di pagina 66, ma con un ingrandimento notevolmente inferiore. (L'ingrandimento sembra maggiore perché la ricottura rende la microstruttura considerevolmente meno fine.) La ricottura stabilizza la configurazione « aperta » del materiale anche dopo che lo sforzo sia stato rimosso. Sono visibili i vuoti (*spazi bianchi*) fra i piccoli fasci di catene polimeriche. Le microfotografie di queste due pagine sono di Hay della Celanese.

Un polimero cristallizzato sferuliticamente la cui fase amorfa si trovi al di sopra della sua temperatura di transizione vetrosa può generalmente essere stirato fino a grandi deformazioni con un processo che è macroscopicamente simile al fenomeno di snervamento e strizione dei polimeri amorfi duttili. Esempi di polimeri semicristallini stirabili sono il polietilene, il polipropilene, il poliossimetilene, il nylon. Il polietilene ad alta densità, che tipicamente è cristallino per il 75 per cento circa, può venire stirato a temperatura ambiente fino a deformazioni del 1500 per cento, senza frattura.

La presenza della fase amorfa nello stato gommoso (al di sopra, cioè, della sua transizione vetrosa) è una condizione necessaria ma non sufficiente per lo stiro dei polimeri semicristallini. Per esempio, il polietilene preparato per cristallizzazione per lunghi periodi a temperature solo leggermente al di sotto del punto di fusione è decisamente fragile. Il trattamento di cristallizzazione a temperatura elevata porta alla formazione di sferuliti grossi e cristalli relativamente perfetti. Quindi sembra che, per ottenere polimeri semicristallini capaci di considerevoli elongazioni senza frattura, un secondo importante requisito sia la presenza di imperfezioni nel materiale, in particolare nelle regioni cristalline.

Le imperfezioni ritenute più importanti ai fini della deformabilità dei polimeri semicristallini sono le molecole-legaccio che costituiscono legami molecolari fra lamelle cristalline contigue. Una cristallizzazione rapida favorisce la formazione di molte molecole-legaccio. La loro presenza interessa le proprietà meccaniche in quanto distribuisce gli sforzi più uniformemente fra tutte le lamelle e per questo migliora la duttilità del materiale.

Come per i polimeri amorfi, le porzioni di polimero semicristallino all'interno e all'esterno della regione di strizione cambiano poco nel corso del processo di stiro. La maggior parte della deformazione è confinata ai bordi del collo. All'interno di questa zona la microstruttura si trasforma da struttura sferulitica orientata a caso in fibrillare altamente orientata con le catene orientate preferenzialmente lungo la direzione di stiro. Il meccanismo secondo cui la struttura orientata a caso si converte in quella altamente orientata è complesso. Fra i processi di deformazione ritenuti importanti figurano la separazione degli sferuliti al loro contorno, lo slittamento lungo le superfici piane dei cristalliti e lo slittamento dovuto a dislocazioni all'interno delle lamelle stesse.

A un certo punto del processo di snervamento avviene una drastica riorganizzazione delle lamelle. Esse appaiono rompersi in piccoli blocchi, e i blocchi si accumulano nella direzione dello stiro, con le catene strettamente parallele a tale direzione. In questo processo, la distanza del centro di una lamella dal

L'effetto dello stiramento sulla microstruttura di un film di polipropilene elastico-duro è visibile in queste fotografie al microscopio elettronico, che mostrano il materiale in assenza di tensione (*sopra*) e dopo uno stiramento verticale dell'80 per cento circa (*sotto*). In entrambi i casi le catene molecolari sono allineate in direzione verticale, che corrisponde alla direzione originale dello sforzo durante la cristallizzazione; si ritiene che le creste orizzontali corrispondano alle coste delle lamelle cristalline. Quando il materiale viene tirato, queste lamelle spanciano di lato in direzione dello sforzo, formando dei vuoti. Quando lo sforzo cessa, la microstruttura ritorna alla configurazione mostrata nella microfotografia in alto. Ingrandimento di circa 110 000 volte.

centro della vicina (o del centro di un blocco dal centro del vicino) passa a un nuovo valore, che è caratteristico della temperatura di stiro e non dello spessore iniziale delle lamelle. Questo fenomeno fa pensare che nella distruzione e riorganizzazione delle lamelle abbia luogo una certa forma di ricristallizzazione.

I blocchi di lamelle si dispongono in piccole microfibrille allineate parallelamente alla direzione dello sforzo. La struttura fibrillare si riflette in una notevole debolezza del polimero completamente stirato in direzioni trasversali alla direzione di stiro. I polimeri semicristallini stirati spesso possono venir divisi in fibre, tali fibre però sono generalmente di una scala molto più grossolana di quella delle microfibrille.

In contrasto con la loro debolezza nelle direzioni perpendicolari alla direzione in cui sono stati stirati, questi materiali sono molto forti in direzione parallela a essa. Se ne deduce che deve esserci un gran numero di molecole-legaccio orientate che connettono i raggruppamenti di lamelle. Oltre a questi aspetti caratteristici della fase cristallina, la frazione amorfa dei polimeri semicristallini stirati presenta anch'essa un grado di orientamento relativamente alto. Le nostre conoscenze circa la natura di questo orientamento dell'amorfo sono però al presente piuttosto limitate, e il ruolo delle regioni amorfe nello stiro dei polimeri semicristallini non è stato ancora chiarito soddisfacentemente.

Per diversi aspetti rilevanti la struttura a fasci di fibrille dei polimeri semicristallini stirati è simile alla struttura nucleata linearmente dei materiali cristallizzati in condizioni di flusso. Entrambe consistono di lamelle impilate nella direzione di orientamento principale con le catene molecolari parallele a tale direzione, hanno una struttura fibrillare e hanno un'alta resistenza nella direzione delle catene a causa dei legami molecolari fra le lamelle. I processi attraverso cui si formano queste strutture sono però molto diversi, e le caratteristiche strutturali dettagliate riflettono tale diversità.

Polimeri semicristallini altamente stirati trovano largo uso come fibre tessili. Nella produzione commerciale di fibre tessili da polimeri come il nylon, il materiale viene generalmente estruso in forma di fibra e cristallizzato sotto sforzi di scorrimento piuttosto bassi. Dopo cristallizzazione le fibre di nylon vengono stirate e in questo processo la struttura si trasforma in una forma altamente orientata con notevole miglioramento delle proprietà meccaniche. I mutamenti microstrutturali che hanno luogo durante il processo di stiro sono per vari aspetti simili a quelli che avvengono nello stiro di polimeri in massa.

Dopo lo stiro, le fibre sintetiche spesso subiscono ulteriori trattamenti al fine di ottenere le caratteristiche di struttura desiderate. Per le applicazioni tessili si impartiscono alle fibre le proprietà di massa e di forma desiderate attraverso una combinazione di trattamenti termici e meccanici. Si forzano le fibre ad assumere nuove geometrie con artifizi come la torcitura intorno a un mandrino. La combinazione di trattamenti termici e meccanici provoca cambiamenti permanenti della microstruttura cristallina del materiale, che deve adattarsi alla nuova geometria. Quando vengono rimosse dal mandrino, le fibre mantengono la tendenza ad attorcigliarsi per via delle modificazioni microstrutturali indotte con la testurizzazione.

Nella manifattura di taluni prodotti polimerici, in particolare di film, la tendenza del materiale orientato in una direzione a fibrillare è un grave inconveniente. Il polimero viene allora lavorato così da allineare le catene in due direzioni. Per esempio, si producono film di polietilene tereftalato orientati in due direzioni prima raffreddando il film dal fuso direttamente nello stato vetroso, evitando che cristallizzi in misura apprezzabile. Si riscalda poi il materiale al di sopra della temperatura di transizione vetrosa e lo si stira prima in una direzione e poi in una seconda ortogonale alla prima. Già durante lo stiro a caldo esso cristallizza in una certa misura, ma il materiale finale altamente orientato e altamente cristallino si ottiene lasciandolo cristallizzare a una temperatura ancora più alta, mantenendolo nel contempo sotto stiro.

Oltre allo stiro, si possono applicare altri metodi per produrre polimeri semicristallini altamente orientati con utili proprietà meccaniche. Un metodo comporta l'estrusione ad alta pressione del polimero solido attraverso un ugello, che riduce di molto la sezione trasversale del materiale. Con il polietilene ad alta densità la sezione trasversale può venire ridotta di un fattore di 30 o più, da confrontare con una riduzione di circa 10-15 volte che si verifica quando il materiale viene stirato. L'estrusione allo stato solido sembra procedere principalmente attraverso la deformazione della microstruttura sferulitica preesistente, presumibilmente secondo lo stesso meccanismo operante nello stiro. Tuttavia, grazie alle maggiori riduzioni di sezione trasversale raggiungibili, l'estrusione permette di ottenere un grado di orientamento molecolare e un'elasticità maggiore di quelli normalmente ottenibili per stiro. L'estrusione di un polimero solido permette di sviluppare anche altre interessanti proprietà. Per esempio, materiali così prodotti sono considerevolmente più trasparenti dei corrispondenti polimeri sferulitici o stirati.

Polimeri altamente orientati possono anche essere prodotti per cristallizzazione in condizioni di flusso. Le proprietà meccaniche di questi polimeri risultano particolarmente interessanti. Quando fibre o film di polimeri come il polipropilene o il poliossimetilene vengono cristallizzati in condizioni di flusso opportuno, i materiali hanno una rigidità simile a quella dei polimeri semicristallini. Allo stesso tempo, quando si rimuove lo sforzo, essi presentano un elevato grado di ricupero elastico. La rigidità di questi materiali «elastici-duri» è maggiore di circa tre ordini di grandezza di quella delle gomme ordinarie. Anziché essere sostanzialmente amorfi nello stato indeformato, essi sono caratterizzati da un alto grado di cristallinità. Il meccanismo proposto per spiegare questo insolito comportamento assume che le lamelle impilate lungo la direzione dell'orientamento funzionino come un insieme di balestre disposte in serie. Quando il materiale snerva, le lamelle sotto sforzo rispondono flettendosi elasticamente, e la flessione elastica risulta reversibile allorché lo sforzo viene rimosso.

La microstruttura dei materiali elastici-duri nello stato non stirato è caratterizzata da schiere di lamelle disposte prevalentemente ad angolo retto rispetto alla direzione originale dello sforzo durante la cristallizzazione. Dopo stiramento, le lamelle appaiono inclinarsi e slittare di lato, così che si creano fra loro dei vuoti (*si veda la figura nella pagina a fronte*). Lo sviluppo di questi vuoti, messo in evidenza da una diminuzione della densità, è stato sfruttato per la produzione di film con pori microscopici. La struttura di questi film viene stabilizzata contro la possibilità che i pori si richiudano mediante un trattamento di ricottura ad alta temperatura del materiale sotto tensione. La dimensione dei pori può essere variata variando la tensione e le condizioni di ricottura.

Tutto il fenomeno della cristallizzazione in condizioni di flusso va acquistando sempre maggior importanza nella tecnologia dei polimeri. Aumentando la velocità di vari processi del polimero, anche le tensioni sul materiale spesso aumentano. In certi casi ne derivano materiali con microstrutture e proprietà del tutto originali.

In questo articolo ci siamo limitati a considerare i polimeri con catene flessibili, capaci di assumere molte configurazioni. Prima di concludere, però, va notato che una seconda classe di polimeri ha importanza in molti sistemi biologici e in svariate applicazioni tecnologiche. Questa seconda classe comprende polimeri con catene relativamente rigide, che possono assumere solo poche configurazioni. Questi polimeri sono solubili soltanto in solventi capaci di vincerne le attrazioni intermolecolari; una volta disciolti, a concentrazioni superiori a un certo valore critico essi formano fasi cristalline liquide. Esempi di questi polimeri comprendono i polipeptidi a elica tipo alfa e la poli-*p*-amminobenzammide. È stato mostrato che polimeri di questo tipo, filati da soluzioni piuttosto insolite, possono produrre fibre con proprietà eccezionali - in taluni casi con una rigidità prossima a quella dell'acciaio e con una resistenza a trazione superiore a quella di una corda di pianoforte.

È ormai chiaro che dai polimeri termoplastici - e anche solo da un singolo polimero - si può ottenere un'ampia gamma di proprietà meccaniche. È pure chiaro che le proprietà di un dato polimero dipendono dalla sua microstruttura, oltre che dalla sua struttura chimica. La microstruttura può facilmente essere variata mutando le condizioni di lavorazione e la realizzazione su misura della chimica e del processo di lavorazione per ottenere microstrutture con proprietà tecnologiche desiderabili sarà uno dei più importanti traguardi dei tecnologi dei polimeri nei prossimi decenni.

# Il matrimonio basato sullo scambio di sorelle

*In Africa, tra i koman, lo sposo deve procurare alla famiglia della sposa un'altra sposa scelta tra le sue sorelle. Tale consuetudine è uno dei cardini del sistema economico e sociale di questa tribù*

di Wendy James

Il matrimonio è considerato ovunque un contratto sociale che comporta non soltanto diritti legali o quasi legali, ma che richiede anche garanzie di buon trattamento e di condotta onesta. Gli studi comparativi sul matrimonio mirano a mettere in risalto le variazioni nel suo contenuto contrattuale da una società a un'altra (monogamia, poligamia, ecc.), o a considerarlo come componente fondamentale di un più vasto modello di struttura sociale (endogamia, esogamia, ecc.). Sebbene lo studio degli aspetti legali e strutturali del matrimonio sia molto utile, esso non è sufficiente a far considerare una particolare forma di matrimonio come una istituzione sociale. Occorre anche tener conto di concetti e valutazioni personali di ordine morale circa i modi e i motivi di comportamento degli individui.

Tra i dinka allevatori di mandrie del Sudan meridionale, per esempio, il contratto matrimoniale è ratificato essenzialmente mediante il passaggio di proprietà del bestiame dalla famiglia dello sposo a quella della sposa. Il significato di tale trasferimento non è di per sé chiaro. A un estraneo esso può apparire una forma di pagamento, mentre per i dinka non si tratta di acquisto, bensì del principale elemento nella formazione di un nuovo vincolo familiare fra le stirpi e a esso segue, significativamente, un passaggio di proprietà di bestiame in contraccambio (ma non dello stesso bestiame) tra i parenti della sposa a quelli dello sposo. In seguito la maggior parte della mandria di buoi ricevuta dalla stirpe della sposa potrà consentire al fratello di costei di sposarsi; così la famiglia di lei acquista stretti legami con quella della sposa del fratello. Le stesse mandrie rappresentano per i dinka qualcosa di più di semplice bestiame, essi, nella loro vita piena di immaginazione, danno loro un alto valore e uccidono qualche animale soltanto durante riti religiosi. È evidente quindi che la cessione di beni in occasione di un matrimonio è qualcosa di più che un baratto di bestiame in cambio di una donna.

In alcune parti del mondo non avviene alcuna cessione di beni in occasione di un matrimonio, ma questo viene suggellato con il contraccambio di una donna facente parte della famiglia dello sposo e la costituzione di un doppio vincolo matrimoniale. Lo sposo deve trovare una sorella, o una stretta parente, da inviare ai familiari della sposa, uno dei quali la prenderà in moglie. Lo scambio può essere trattato con una lunga, prolissa consultazione tra gli anziani, o può scaturire da un accomodamento spontaneo o da un rapido, improvviso accordo tra i giovani stessi. A un esame superficiale questo matrimonio-scambio è spesso stato considerato una semplice istituzione, interpretabile come una forma primitiva di contratto matrimoniale. Per esempio, Sir James Frazer lo considerò un'usanza economicamente conveniente in una fase primitiva della storia dell'umanità, prima che gli uomini avessero delle proprietà. Una sorella rappresentava il patrimonio di maggior valore che un uomo possedeva ed era quindi logico che egli la inserisse in una transazione per avere una moglie. Robin Fox segue la tesi di Frazer nel collocare il matrimonio-scambio agli albori dello sviluppo sociale, ma egli lo giustifica con le esigenze della collettività piuttosto che con un atto decisionale e individuale (maschile). Claude Lévi-Strauss ha considerato il matrimonio-scambio come una manifestazione particolarmente chiara e semplice di un principio di mutualità o di reciprocità che si trova diffuso, talvolta a livello dell'inconscio, in tutti i sistemi di parentela o di matrimonio.

Considerato come un insieme di regole di comportamento di estrema semplicità (*A* sposa la sorella di *B*, *B* sposa la sorella di *A*), il matrimonio basato sullo scambio di sorelle appare elementare. Non vi è formula, tuttavia, che riesca a rappresentare efficacemente la complessità di un genere di vita vissuta in base a questo tipo di rapporti. Anche se le inevitabili complicazioni demografiche sono evidenti, al pari dei sistemi con i quali la gente riesce ad aggirarle, non è facile intuire il motivo per cui questa gente aderisca con tanta costanza a tale sistema. Se, d'altro lato, pensiamo alle più ampie implicazioni del matrimonio-scambio come contratto sociale, cioè alle implicazioni che si estendono, al di là della definizione formale, fino alla sfera dei concetti morali, esso diventa più complesso da descrivere, ma è anche più facile riconoscerne per via intuitiva il valore. Recentemente ho effettuato qualche ricerca tra le popolazioni di lingua koman che vivono al confine fra il Sudan e l'Etiopia, dove questo tipo di matrimonio è considerato l'ideale, pur tra complicazioni e contrasti. Da tale pratica derivano quelle idee dei diritti di uguaglianza, di giustizia e di onore che non si possono arbitrariamente trascurare come semplici e primitive, e che sono state tramandate nella storia dei koman anche dopo la scomparsa del matrimonio-scambio in alcune aree.

Le popolazioni che parlano i dialetti del gruppo koman variano tra le 60 000 e le 100 000 unità. Vivono in comunità sparse sulle colline e nelle vallate dell'Etiopia occidentale e ai confini di questa con il Sudan. Gli etiopi degli altipiani si tengono lontani da queste savane boscose perché sono calde, malariche e selvagge e i sudanesi le evitano perché sono umide e collinose. Le popolazioni koman, invece, fanno un buon uso del terreno boscoso, luminoso e aperto. Con la loro bassa densità di popolazione essi praticano una agricoltura di sussistenza, coltivando i campi a sorgo, mais, fagioli e radici commestibili, spostando dopo qualche anno a breve distanza i loro piccoli villaggi e i loro campi. Sebbene la mosca tse-tse e altri inconvenienti rendano impossibile pascolare il bestiame in alcune zone, essi allevano piccole mandrie di animali domestici e vanno a caccia di animali selvatici a piedi, con lancia, arco e frecce, o col fucile. La foresta procura loro miele, frutti selvatici, erbe, radici e materiale da costruzione, e i fiumi, sebbene in alcuni punti siano stagionali, permettono loro di pescare.

Nonostante le apparenze, le popolazioni koman non vivono in isolamento. Essi hanno mantenuto per lungo tempo collegamenti con gli amhara e con i galla etiopici, con gli arabi e con i sudanesi che abitano le rive del Nilo. In quasi tutti i piccoli villaggi sono noti, almeno agli uomini, sia l'arabo che il linguaggio dei galla, mentre nel sud è ben conosciuto il linguaggio nilotico annak. Tuttavia le popolazioni koman mantengono tanto il loro gruppo di dialetti quanto il loro costume di vita, giacché molti dei contatti avuti con stranieri sono stati violenti ed è ancora vivo il ricordo della tratta degli schiavi.

Le mie ricerche sul luogo sono state condotte su tre gruppi di koman: i gumuz, che praticano un rigoroso sistema di matrimonio-scambio; i komo, che hanno parzialmente sostituito il matrimonio-scambio con un sistema di rimunerazioni compensative in caso di matrimonio, e gli uduk, che sembrano aver abbandonato il sistema dello scambio, rifiutato di accettare quello delle rinumerazioni e trovato un loro proprio sistema alternativo. Prima di fare ulteriori considerazioni su queste usanze matrimoniali, è però necessario formarsi un'idea circa le attitudini di queste tre popolazioni verso gli scambi e le transazioni in generale. Lo sforzo produttivo di tutti i koman è rivolto al raggiungimento dell'autosufficienza e della conservazione delle risorse piuttosto che allo sviluppo economico e agli scambi commerciali. I lavori agricoli sono organizzati in larga misura sulla base di una amichevole cooperazione; le mansioni più importanti nei campi appartenenti a ogni individuo sono svolte da gruppi di suoi parenti e vicini, che ritornano per il pasto, e se possibile, anche per una bevuta di birra, preparati dalle donne della sua casa. Il prodotto dei campi, come quello della caccia, non è tenuto in serbo dalla fami-

Il raccolto di cereali viene trasportato in canestri dai campi dalle donne degli uduk, una popolazione koman che vive lungo il confine tra il Sudan e l'Etiopia. Alcuni dei koman praticano quasi esclusivamente il matrimonio-scambio; altri praticano anche matrimoni con rimunerazioni in denaro. Gli uduk hanno sviluppato un loro particolare sistema di matrimonio.

**Il matrimonio con scambio di sorelle è stato ed è ancora praticato tra i nyende del Dahomey, tra i tiv e altre popolazioni in Nigeria, tra gli amba dell'Uganda, tra i pigmei mbuti di Ituri e tra più di 60 000 koman che vivono lungo il confine tra il Sudan e l'Etiopia. L'autore ha svolto la sua ricerca principalmente tra le popolazioni koman.**

glia, ma viene ripartito e buona parte di esso ritorna nel ciclo come cibo e birra per i raduni festivi dopo i lavori dell'anno seguente.

Questa forma di mutua assistenza e di distribuzione dei prodotti impone all'individuo degli obblighi, ma al medesimo tempo gli dà una certa sicurezza in caso di necessità. In questo genere di società, forse ancor più che in altre, nessun uomo o nessuna donna può avere una vita indipendente. I legami creati dalla mutualità degli obblighi e della fiducia sono di importanza vitale. Viceversa, gli scambi e le transazioni in denaro basati sul profitto sono solitamente evitati nell'ambito della comunità e, qualora si verifichino, avvengono più probabilmente con stranieri. Lo scambio di beni e servizi entro la comunità non è soggetto ad alcuna valutazione rigorosa; ci si attende che esso rientri in uno spirito di generosità e non in quello della caccia al guadagno. Sebbene ciò non avvenga in ogni circostanza, questo comportamento è pur sempre un modello di onorabilità secondo il quale le azioni possono essere giudicate. In una simile economia di sussistenza il denaro ha una funzione marginale; non è infatti necessario alla sopravvivenza. Talvolta i gumuz portano al mercato cotone e grano; i komo, miele e pesci e gli uduk sesamo. In questo modo essi possono venire in possesso di un po' di denaro, che ha però il carattere di un guadagno occasionale e viene speso in beni di consumo, per esempio abiti.

I gumuz, che abitano nella valle del Nilo Azzurro, sono la più numerosa delle popolazioni koman. Essi praticano anche il sistema più elaborato e rigoroso di matrimonio con scambio di sorelle. Gli scambi hanno luogo tra clan di discendenza paterna, e solitamente sono concordati fra gli anziani del clan, che godono di un considerevole ascendente sugli uomini e sulle donne più giovani. Se un matrimonio assume la forma di una fuga amorosa e a esso non segue uno scambio, è considerato un furto e potrebbe provocare una violenta rappresaglia. La situazione può essere ricondotta alla normalità qualche anno dopo, quando si trova una fanciulla da dare in cambio, o anche nella generazione successiva, quando una figlia della donna «rubata» può essere restituita, in sostituzione della madre.

All'interno del clan o fra clan strettamente imparentati si possono verificare complicate trattative per prendere o cedere in prestito le fanciulle per lo scambio. Quando ci si fa dare una fanciulla da un membro del clan per scambiarla con una moglie, si dovrebbe in seguito dare in cambio la propria figlia (la cui nascita è resa possibile grazie allo scambio), a quel membro del clan o a suo figlio in sostituzione; la stessa figlia potrà poi, a sua volta, essere oggetto di scambio. Viene così a crearsi un complesso di obblighi che vincolano queste genti per generazioni, sia tra i clan che all'interno di essi. Una volta stabilitosi, un vincolo di matrimonio-scambio è di per sé destinato a durare nel tempo; se una moglie muore, se ne può trovare una sostituta (e anche una seconda se questa muore a sua volta). Le fanciulle promesse in cambio possono andare a vivere anche in tenera età presso la famiglia del futuro marito ed essere allevate colà in previsione del futuro matrimonio. È comune anche il caso che una vedova sia ereditata da uno dei fratelli del marito. I padri esercitano uno stretto controllo sul matrimonio delle loro figlie, destinandole all'uno o all'altro dei loro figli o nipoti, o anche scambiandole per poter avere essi stessi una seconda moglie.

Nessuno dei gumuz sfugge a questa rete di scambi; non esiste altro tipo di contratto matrimoniale. In un gruppo campione esaminato l'estate scorsa relativo a 371 matrimoni due soltanto sono avvenuti mediante rimunerazione in denaro e ambedue risultarono assolutamente eccezionali. Il primo caso era quello del padre di un vecchio che molti anni prima aveva riscattato dalla schiavitù la propria moglie, e il secondo era quello di un giovane che aveva recentemente pagato una forte somma di denaro alla madre di sua moglie. Ciò era avvenuto perché la madre non aveva permesso a nessuno dei suoi parenti acquisiti di usare sua figlia per uno scambio (alcuni anni prima questi parenti le avevano ucciso un figlio).

I komo sono oggetto di particolare interesse per il fatto che il loro sistema matrimoniale sta ora cambiando. Le passate agitazioni e le pressioni dell'attuale governo hanno causato la dispersione dei clan patriarcali dei komo e l'autorità degli anziani è assai più debole che fra i gumuz. La posizione delle donne, in particolare delle più giovani, è più indipen-

dente. La maggior parte dei matrimoni fra i komo è ancora del tipo dei matrimoni-scambio, ma una percentuale sempre maggiore viene ratificata mediante una rimunerazione alla famiglia della sposa.

I nostri informatori komo ritengono che il matrimonio-scambio sia stato praticato fin dai tempi più antichi della loro storia. Se si chiede loro perché preferiscano fare scambi, essi probabilmente risponderanno: «Non siamo tutti figli di fanciulle scambiate? Così anche noi dobbiamo fare questi scambi.» Come fra i gumuz, si presume di norma che un uomo non si sposi nel suo clan di discendenza paterna o in quello di discendenza materna. Ne risulta che quegli scambi non si ripetono da una generazione all'altra tra gli stessi gruppi di popolazione o tra gli stessi clan. Per ogni clan, a ogni nuova generazione si formano nuove

MAO KOMO UDUK SHITA GANZA KWAMA GUMUZ

Le sette popolazioni di lingua koman che si trovano sui lati opposti del confine tra Sudan ed Etiopia sono generalmente distribuite lungo il Nilo Azzurro e i suoi tributari a est, o lungo i fiumi perenni o semiperenni che scorrono verso ovest nella parte meridionale del Sudan. I dati sui komo si riferiscono al villaggio di Sombo Gerre.



diramazioni di vincoli matrimoniali di parentela. I komo ammettono la poligamia (cioè un determinato individuo può essere sposato a più di una donna nel medesimo tempo), ma la donna può essere la moglie di un uomo soltanto, fino allo scioglimento di quel matrimonio.

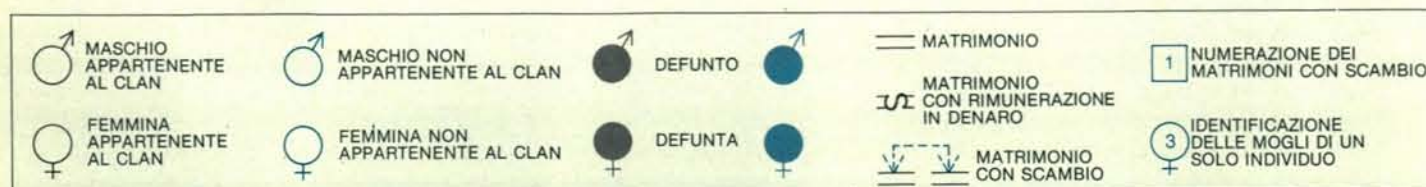
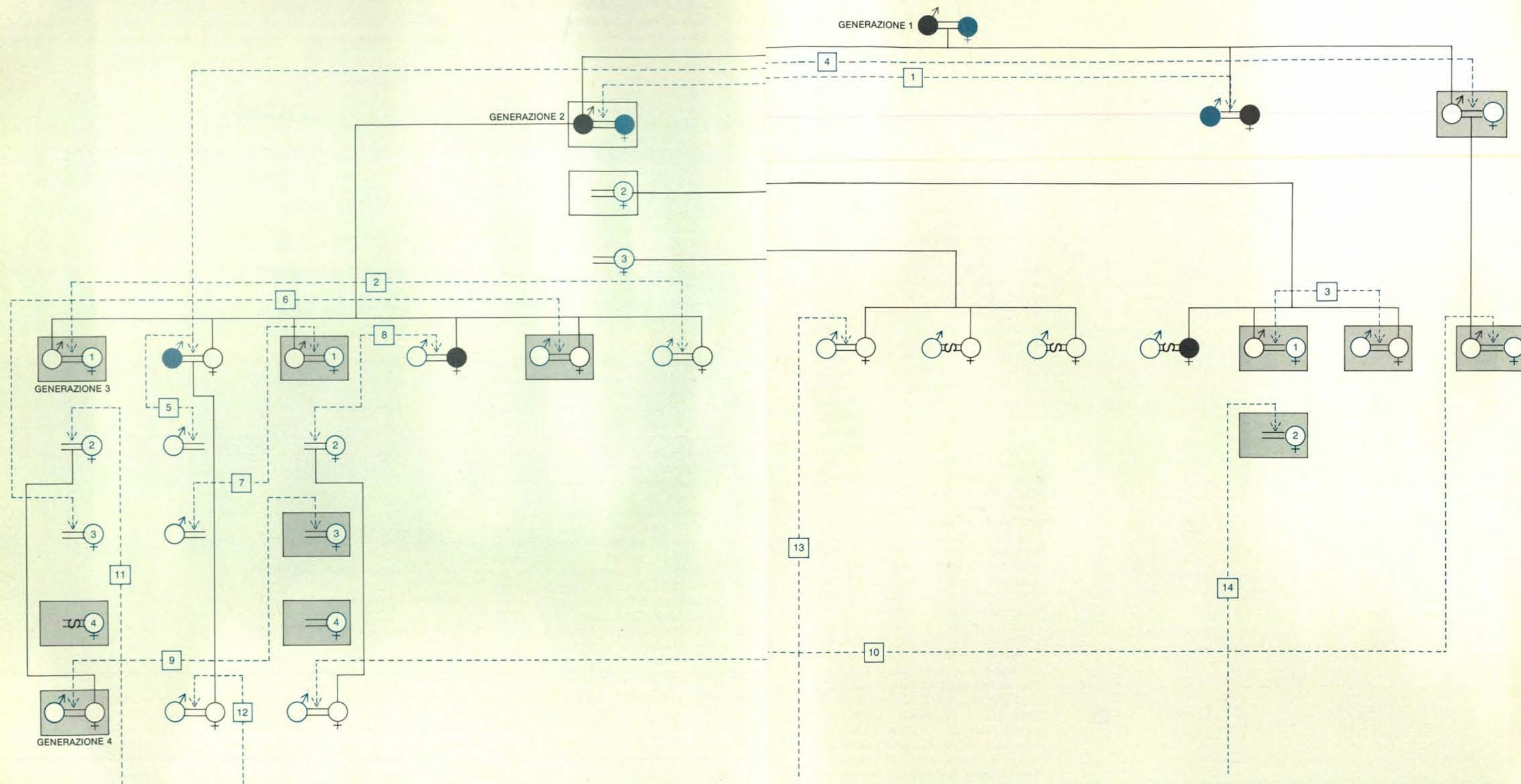
Quando i komo parlano delle loro mogli o sorelle o della loro «prediletta» (la fanciulla che essi scambiano per avere una moglie), essi nòn pensano alle donne come a beni commerciali. Per essi il costume matrimoniale è imperniato sul concreto valore delle donne, che sono determinanti per il suo funzionamento. Il lavoro di una donna è complementare a quello degli uomini della sua famiglia, e quando una fanciulla si sposa, suo padre e i suoi fratelli la perderanno, a livello utilitario. Viceversa, quando una nuova moglie entra a far parte di un villaggio, essa sarà giudicata come una lavoratrice della comunità intera. Al di là di queste semplici considerazioni, una donna è preziosa come madre potenziale. La dignità sociale della donna nella propria comunità o in quella del marito deriva da questo fatto e, come madre potenziale, essa stessa si considera il cardine degli accordi per i matrimoni-scambio.

I komo giudicano la donna come la fonte da cui la comunità locale, e quindi la società intera, avrà il suo compimento e potrà svilupparsi. Essi considerano i legami fisici tra il figlio e la madre più forti di quelli tra il figlio e il padre, e vedono la continuità naturale della società passare di madre in figlia. Una risorsa potenziale di sorelle per le generazioni di nuove vite è considerata come appartenente «per natura» a questa linea femminile. I patti matrimoniali, tuttavia, interrompono questa linea di discendenza naturale, e il matrimonio-scambio, in particolare, si risolve nel trasferimento della potenziale discendenza di una sorella dalla tutela della sua gente a quella della famiglia del marito. Se un matrimonio-scambio si scioglie, i diritti sui figli di una sorella possono ritornare alla famiglia d'origine, soprattutto al fratello. Tra i komo, e più precisamente tra i gruppi menzionati dei quali si esamina la storia e la politica, vi sono dei clan che non si basano su questa idea della discendenza matrilineare, ma sui legami di discendenza paterna da padre a figlio.

Sombo Gerre è un villaggio etiopico moderno abitato soprattutto dai komo. (L'intera popolazione ammonta a 117 individui.) Molti di questi abitanti sono stati profughi, alcuni di essi più di una volta. Si tratta di una comunità ricostituita di tipo tradizionale che annovera qualche individuo proveniente dalla più grande città di Gambela e la cui

Il matrimonio con scambio di sorelle è il più diffuso tra i gumuz, come dimostrano questi dati sui matrimoni raccolti dai capi delle casate nel villaggio di Aba Bulcho. Di 371 matrimoni avvenuti nell'arco di quattro generazioni, circa il 90 per cento comportarono scambi simultanei o supplementi di scambi, come nel caso della sostituzione di una moglie deceduta o del diritto di ereditare una vedova. Meno del 10 per cento di matrimoni ebbe luogo mediante ratto senza il relativo scambio, e in parecchi casi fu anticipato il rimborso definitivo. Abbiamo riscontrato soltanto due esempi di matrimonio con pagamento di denaro, ambedue avvenuti in circostanze del tutto particolari.

attuale composizione risale a circa 6 anni fa. In questa regione si è avuta per lungo tempo un'instabilità sociale che si è aggravata durante un periodo di disordini nel Sudan meridionale dal 1956 al 1972. Malgrado questi disordini i valori tradizionali hanno conservato la loro efficacia. Lo scambio di sorelle è tuttora un punto di riferimento nelle discussioni familiari e matrimoniali, anche se per diversi anni alcuni matrimoni sono stati ratificati mediante il sistema delle rimunerazioni e negli ultimi due anni la politica ufficiale etiopica ha dovuto sostituire il matrimonio-scambio con quello dei pagamenti in denaro. La somma provvisoriamente convenuta con i capi locali dei komo era stata di 150 dollari etiopici per una donna che non fosse stata precedentemente sposata o di una somma da 50 a 80 dollari per una donna che non fosse al suo primo matrimonio.

Questa politica appare del tutto razionale da un punto di vista amministrativo, che vuole ottenere una maggiore integrazione dei komo nella società etiopica e introdurli nel sistema monetario. Rappresentanti ufficiali del governo sostengono che le remunerazioni in denaro si riveleranno più eque, giacché col vecchio sistema un uomo che non avesse sorelle non potrebbe sposarsi. Il vecchio sistema, tuttavia, possiede una notevole flessibilità nella ridistribuzione di «fratelli» e «sorelle»; io non ho riscontrato un solo caso di un uomo che fosse assolutamente impossibilitato a sposarsi a causa della mancanza di una sorella. I komo considerano la situazione in modo del tutto diverso: la vecchia generazione non può ritenere i pagamenti in denaro come un modo onorevole di trasferimen-

**In questa tabella genealogica semplificata appaiono i membri sposati, vivi e defunti, tratti da quattro generazioni del clan di Pwogo Kabach che vivono nel villaggio di Sombo Gerre e dintorni. I tredici sposi della terza generazione, tra i quali quattro uomini e nove donne, sono discendenti di due fratelli; un fratello (*a destra*) ha soltanto una moglie e l'altro (*a sinistra*) si è sposato tre volte. Dei 31 matrimoni riportati nella tabella, soltanto quattro furono ratificati sulla base di un rimborso alla famiglia della sposa, mentre altri 24 sono matrimoni con scambio di sorelle. Le linee tratteggiate orizzontali con frecce numerate da 1 a 10 (*in colore*) collegano le 10 donne entrate come mogli nel clan con le 10 donne del clan andate spose al di fuori di esso. Le linee tratteggiate verticali con frecce numerate da 11 a 14 (*in colore*) indicano gli altri quattro scambi; i matrimoni reciproci non figurano nella tabella. I rettangoli (*in grigio*) indicano i residenti nel villaggio.**

to di una moglie, sia per coloro che ricevono la donna, sia per coloro che ricevono il denaro. E quanto a un uomo della generazione più giovane, la cui sorella sia in procinto di sposarsi, egli verosimilmente reagirà esigendo una adeguata e completa rimunerazione e insistendo nella richiesta di una fanciulla in cambio, o di una forte somma di denaro, piuttosto che perdere la faccia accettando una misera prima quota di rimborso. Da un punto di vista femminile il nuovo tipo di matrimonio con rimborso in denaro impone a una moglie obblighi assai più lievi: la fondamentale devozione a un fratello può far trascurare l'impegno verso il marito, mentre nel sistema matrimoniale di scambio, la fedeltà a un fratello paradossalmente rafforza il legame matrimoniale (se una donna si comporta male col proprio marito, l'altra donna può fare altrettanto col fratello di lei). Le relazioni matrimoniali divengono perciò molto più fragili e il fattore rivendicativo nel perseguire i diritti e la giustizia nell'ambito dei rapporti creati dal vecchio contratto di reciprocità diviene più evidente man mano che il contratto matrimoniale di scambio va ufficialmente perdendo importanza.

Alcuni particolari della situazione in cui si trovano gli abitanti di Sombo Gerre (come si è verificato verso la fine dell'anno scorso) fanno luce su questi aspetti della questione matrimoniale. Il numero totale delle coppie sposate, ivi comprese 20 coppie per le quali gli accordi matrimoniali non erano perfezionati, fu di 151. Circa i due terzi di tutti questi matrimoni furono stipulati col metodo dello scambio di sorelle, le quali furono realmente oggetto di scambio in circa la metà delle transazioni. Nei rimanenti casi avvennero scambi che riguardavano parenti più o meno lontani del clan, talvolta appartenenti a una generazione successiva, e in alcuni casi entrarono nello scambio fanciulle che erano imparentate per via di una sorella del padre o di qualche altra donna del clan. Questo accade, per esempio, quando una donna della generazione precedente si è sposata ma è poi ritornata con i propri figli alla sua casa di origine perché lo scambio non era stato adeguatamente perfezionato. La figlia di costei, cresciuta insieme al figlio del fratello di sua madre, possiede allora i requisiti che la rendono adatta a essere scambiata con una moglie per questo figlio.

A Sombo Gerre vi sono quattro clan principali e fra tutti esistono vincoli derivanti da matrimoni-scambio, sia tra le generazioni viventi sia fra quelle estinte. Vi sono anche legami con alcuni dei clan meno rappresentati nel villaggio, ma la maggior parte dei vincoli derivati da matrimoni-scambio interessa villaggi distanti fino a 50 miglia, sia oltre il confine, nel Sudan, sia nella regione di Gambela. Da un certo punto di vista si può affermare che tali legami contribuiscono a tener collegati gli sparsi frammenti della società dei komo. Esistono anche relazioni di parentela dovute a matrimoni-scambio con altri gruppi di koman, come i kwama e gli shita, ma non con i niloti, i galla o gli arabi.

L'aspetto integrativo del matrimonio-scambio è evidente inoltre nel fatto che, anche quando un singolo scambio è vanificato dalla rottura di un matrimonio o in caso di morte, si può attribuire alla parentela un valore che va al di là

a

**Il principio di conservazione nel matrimonio-scambio è evidente in questo diagramma. Le due famiglie (*in alto, a*) sono quella di Moga (*1, a sinistra*) e le sue sorelle Kanato (*2*) e Tirbi (*3*) e quella di Kwanta (*1, a destra*), sua sorella Kokosh (*2*) e la sorella acquisita Naiko (*3*), in realtà figlia della sorella di suo padre. Quando Moga sposò Naiko e Kwanta si unì a Tirbi (*b*), le famiglie furono unite dallo scambio di sorelle. Ben presto Tirbi morì, rompendo l'equilibrio dello scambio (*c*), e Naiko fu accolta nuovamente dai suoi in attesa di una ricostituzione dell'equilibrio stesso. Quando Naiko a sua volta morì (*d*), lo scambio originario fu reso nullo. La parentela delle famiglie fu conservata perché Moga scambiò sua sorella Kanato con Kokosh, la sorella di Kwanta.**



degli individui direttamente interessati. Così, quando muore un marito, la sua vedova può essere ereditata dal fratello di lui, che tutela il vincolo dovuto allo scambio e con esso il matrimonio complementare. Ecco un esempio da me rilevato a Sombo Gerre. Atwis, del clan Pwogo Kabach, sposò Dingitu, e la figlia di suo fratello fu data in moglie a Zado, fratellastro da parte paterna di Dingitu. Zado morì, ma suo fratello Bameto poté prendere il suo posto e così il lungo e fecondo matrimonio di Atwis e Dingitu fu salvo. Un altro esempio è quello di Abos, del clan Galida, che ereditò Basi-da, la vedova di suo fratello minore, morto durante una caccia. Reciprocamente, quando muore una donna, una sorella può sostituirla.

Il principio del mantenimento di una parentela derivata da uno scambio appare chiaramente nei due matrimoni di Moga (*si veda la figura nella pagina a fronte*). Egli dapprima sposò Naiko (figlia della sorella del padre di Kwanta) e per lo scambio Kwanta sposò Tirbi, sorella minore di Moga. In seguito Tirbi morì e Naiko, la moglie di Moga, a causa di tale morte fu riaccolta in casa dai suoi genitori. Poco dopo anche Naiko morì. Quindi i cognati, doppiamente in lutto, decisero di combinare un nuovo matrimonio-scambio. Moga diede in cambio la sua sorella maggiore Kanako per avere Kokosh, una delle sorelle (vere) di Kwanta.

Il clan Gali di Sombo Gerre rappresenta un gruppo i cui membri erano per la maggior parte cresciuti nel più grande centro di Gambela. Alcuni di essi vivono ancora colà; per esempio, Dante è un mercante che vive in città e che ha contratto tre matrimoni con rimunerazioni in denaro. È interessante notare, tuttavia, che coloro che ritornano dalla città al villaggio si trovano nuovamente coinvolti nel sistema del matrimonio-scambio. Nel caso di Abos, che ho già nominato, ciò che lo ricondusse dalla città al villaggio fu la sua parziale responsabilità verso la vedova del suo defunto fratello, nella controversia relativa a uno scambio. Suo figlio Dwop e il figlio del suo fratellastro Mustafa contrassero ambedue matrimoni-scambio dopo il ritorno dalla città, dove in precedenza si erano sposati secondo le norme del matrimonio con rimunerazione in denaro.

Il principio della conservazione delle risorse umane ha grande importanza tra i komo per ciò che riguarda l'elemento femminile. Essi parlano di matrimonio in termini di perdita di una sorella piuttosto che di acquisto di una moglie e se si perde una sorella e non avviene alcuna sostitutiva o adeguata rimunerazione matrimoniale, i suoi figli sono richiesti in restituzione dalla sua gente. A volte una sorella può ritornare a casa con i suoi figli dopo lo scioglimento di un matrimonio, a volte invece uno o due figli vengono reclamati dalla famiglia della loro madre, se la sua compagna di scambio è risultata sterile. Rivendicazioni di questo genere, che possono condurre i figli a essere allevati nel clan d'origine della madre e a formare con essa un nucleo familiare al fine di futuri matrimoni-scambio, sono considerate puramente come esigenza di equità, senza considerazione alcuna per i sentimenti dell'individuo. Pure la reciprocità dei divorzi è considerata giusta, anche nel caso che una delle due coppie non desideri separarsi. Se il contratto è stato rotto, si considera come un diritto che debbano prevalere rivendicazioni di ordine naturale e che i figli ritornino alla famiglia dei fratelli della loro madre, piuttosto che essere allevati in quella dei parenti paterni.

Ciò sarà reso più chiaro da un esempio (*si veda l'illustrazione a pagina 80*). La terza sorella di Adebe, Midi, fu data in moglie a un uomo che non provvide mai ad alcuno scambio o rimunerazione in denaro, e, poco dopo aver dato alla luce un figlio, essa morì. Adebe subentrò nella responsabilità verso il bimbo, Abunsa, che da allora ha sempre vissuto e lavorato con lui. Il ragazzo, afferma Adebe, fa ora parte del suo nucleo familiare ed è suo compito trovare per Abunsa una fanciulla da offrire in cambio di una moglie per lui, oppure una somma in denaro perché egli possa sposarsi. Se egli farà questo, i futuri figli del ragazzo apparterranno anch'essi al nucleo familiare di Adebe. Con Adebe vivono anche due figlie sposate, ognuna con un bimbo; questo avviene perché i loro mariti non hanno ancora procurato alcuno scambio o somma in denaro, sebbene Adebe lo reclami. Se non avviene un contraccambio di questo genere, i figli delle sue figlie saranno anch'essi allevati come membri della famiglia di Adebe. Quando chiesi ad Adebe che cosa avrebbe fatto se avesse ricevuto del denaro per i matrimoni delle figlie, egli rispose che avrebbe dato il denaro prima di tutto al figlio di sua sorella, Abunsa, perché potesse sposarsi, e poi al fratello minore perché potesse contrarre un nuovo matrimonio (questo fratello, Nadir, non ha figlie). Io chiesi se non avrebbe voluto invece spendere quel denaro per sé, ed egli rispose: «Quando io mi sposai mia sorella fu ceduta in cambio di mia moglie. Perciò se io ricevo del denaro per i figli che Dio mi ha dato, non posso spenderlo. Devo darlo ad altri.»

I criteri di Adebe sono tipici della generazione più anziana dei komo. Il denaro ricevuto come compenso per la cessione di una sposa deve essere messo da parte per usarlo in occasione di ulteriori matrimoni nella famiglia; per Adebe quindi, spenderlo per sé sarebbe stato indubbiamente disonorevole. Per alcuni uomini più giovani, tuttavia, il matrimonio con rimunerazione in denaro sta diventando un gioco sconsiderato, in cui l'idea dei diritti di un individuo si concreta in quella di una pignola esazione, a spese dell'impegno morale che si suppone essere parte integrante del contratto matrimoniale.

Consideriamo la condotta di Agede, membro del clan Pwogo Kabach e figlio di una sorella di Adebe. Suo padre si trovava nel villaggio di Tsokolmas, a due o tre giorni di cammino da Sombo Gerre, e Agede stava assumendo una posizione indipendente riguardo al suo matrimonio e a quello delle sue sorelle. La sorella maggiore era fuggita a Tsokolmas tre anni prima e Agede aveva richiesto un pagamento in denaro anziché uno scambio. La famiglia del marito aveva già pagato 80 dollari etiopici, ma Agede ne richiedeva 200. Quando gli chiesi il motivo per cui egli avrebbe voluto ottenere tanto, egli furbescamente spiegò che sua sorella ora aveva un figlio e una figlia e che insieme essi contavano per tre. La fanciulla col tempo sarebbe stata ceduta in moglie in cambio di denaro, e anche il ragazzo avrebbe procurato denaro a suo padre. «Essi saranno ricchi e io voglio ora i miei 200 dollari». La seconda sorella di Agede si era sposata due anni dopo a Tsokolmas, ma egli non aveva ancora richiesto alcun pagamento; egli stesso recentemente era fuggito da Tsokolmas con una fanciulla, per la quale egli intende pagare un compenso matrimoniale quando avrà raccolto il denaro dovutogli per le sue sorelle. Egli, oltre alla possibilità di trarre un buon profitto da questi accordi, sta cercando anche di ottenere una forte somma, in relazione al suo primo matrimonio avvenuto parecchi anni fa. A questo riguardo, c'era stato uno scambio, ma sua moglie era morta senza figli e sua sorella invece ne aveva avuto uno. Agede attese un anno, poi richiese un'altra moglie in cambio; quando gli venne rifiutata egli si riprese la sorella togliendola al marito. Essa fuggì parecchie volte per tornare dal marito, ma fu sempre richiamata indietro dal fratello. Alla fine il marito portò 50 dollari come rimunerazione per la moglie, e sebbene gli anziani del clan di Agede a Sombo Gerre accettassero il denaro, egli lo rifiutò. Suo padre lo sostenne nella richiesta di 300 dollari, una somma scandalosa non solo per essere molto elevata, ma anche in considerazione del fatto che veniva richiesta a una coppia che si amava in modo così evidente.

L'effetto logorante dei matrimoni con rimunerazione in denaro sui legami tra i clan è evidente in questa sequenza di casi riguardanti la famiglia di Adebe (*a sinistra*), il più anziano di due fratelli. Delle tre sorelle di Adebe, (*a*, *in alto*), due (*a destra*) furono date in sposa per avere mogli da destinare ad Adebe e a suo fratello Nadir. Midi (*l'ultima a sinistra*), fu data in moglie a un uomo che mancò di perfezionare il suo contratto, non avendo provveduto né a un rimborso in denaro, né allo scambio con una sposa proveniente dal suo clan. Midi generò un figlio, Abunsa, e poi morì (*b*). A causa del mancato perfezionamento del contratto, il fratello di lei Adebe si è preso il nipote e lo sta allevando nel proprio clan in attesa di tale perfezionamento da parte del padre del ragazzo. La moglie di Adebe intanto ha dato alla luce due figlie (*a sinistra*) e ambedue sono andate spose a uomini che pure lasciarono incompleto il contratto matrimoniale. Le figlie e la loro discendenza ora vivono con Adebe (*c*); egli le tiene con sé finché i mariti non saranno in grado di soddisfare ai loro obblighi.

Lungi dall'essere una semplice istituzione integrativa, lo scambio di sorelle, come qualsiasi altro contratto, determina un'area di potenziale conflitto attraverso la rivendicazione dei propri diritti da ambedue le parti. Una delle principali fonti di conflitto è tradizionalmente la situazione di una fanciulla che viene data in moglie, per completare lo scambio, per esempio a un uomo più anziano che essa non conosce. La sua posizione è considerata infelice presso i komo, specialmente quando i due innamorati che hanno preso l'iniziativa nel combinare lo scambio sono soddisfatti l'uno dell'altro: essa non vorrà nuocere al proprio fratello rifiutando di andare a vivere con il marito assegnatole. Talvolta però essa rifiuta, e il suo parente più prossimo, per esempio suo padre, prenderà le sue difese contro gli anziani del suo clan che hanno dato la loro approvazione allo scambio. Fu una situazione di questo genere che condusse a uno scontro armato e a una morte, verso la fine dello scorso anno, nella regione di confine tra il Sudan e l'Etiopia. Quando uno scambio promesso non viene realizzato non può che dar seguito a una rappresaglia. Se ne risulta una contesa, una morte è vendicata con un'altra morte o è ripagata con la cessione di una donna senza matrimonio.

L'abbandono del sistema dello scambio di sorelle come tale non sarà sufficiente a introdurre i komo nell'economia monetaria degli altipiani etiopici. È più probabile che la loro società si avvii a imitare quella degli uduk, i loro vicini del Sudan, il cui linguaggio è molto simile, e che una volta vivevano a più stretto contatto con i komo. La maggior parte delle popolazioni uduk non segue l'usanza del matrimonio-scambio, anzi afferma di non averla mai seguita. Essi, tuttavia, ne hanno conoscenza. Lo chiamano «matrimonio rivendicativo» e in qualche occasione alcuni villaggi lo praticano in questo spirito. Tuttavia mancano gli accordi onorevoli di scambio degli anziani gumuz e komo, e i giovani abitanti dei villaggi uduk si divertono a compiere fughe amorose di rivalsa.

Vi sono indizi tali da far supporre che gli uduk abbiano praticato in passato lo scambio di sorelle, ma che l'usanza sia andata perduta nel corso di ripetuti spostamenti di profughi. Oggi il sistema sociale uduk è saldamente basato sul principio della continuità della discendenza materna, che, come ho notato, è una caratteristica fondamentale del pensiero dei komo, e che sembra essere diventata dominante con la progressiva scomparsa del contratto di matrimonio-scambio. Gli uduk hanno opposto resistenza ai tentativi ufficiali di far loro pagare un compenso per avere una moglie; per essi questa è una transazione mercenaria, paragonabile alla schiavitù.

La scomparsa del matrimonio-scambio per motivi pratici non ha modificato i concetti di giustizia e di correttezza sociali che gli uduk hanno in comune con le altre popolazioni koman.

I sistemi sociali dei gumuz e dei komo che si basano sulla discendenza paterna e degli uduk che si basano su quella materna, differiscono superficialmente, ma possono essere considerati strettamente collegati per ciò che riguarda una comune moralità nel campo della reciprocità personale e di gruppo e in modo particolare per ciò che riguarda le relazioni economiche e matrimoniali. I komo occupano una posizione intermedia fra i gumuz, con i loro forti clan di discendenza paterna, con l'autorevolezza del clan stesso e con un sistema di scambio matrimoniale pienamente efficiente, e gli uduk, privi del sistema di scambio, con una debole autorità familiare e con una condizione femminile più emancipata. Tutto considerato, con il rifiutare il pagamento di una somma per una moglie, gli uduk hanno tenuto le loro questioni di parentela, anche se in modo negativo, libere da ogni influenza esterna.

Vi sono altre due importanti regioni dell'Africa in cui è praticato il matrimonio-scambio, o almeno lo è stato fino a poco tempo fa. Una di esse è la fascia mediana dell'Africa occidentale, che si è spopolata in seguito alla tratta degli schiavi attraverso il Sahara e l'Atlantico. Lo scambio di sorelle era comune fra le popolazioni dell'altopiano della Nigeria e nel Camerun settentrionale, e, secondo alcune recenti testimonianze, sarebbe ancora praticato dai nyende del Dahomey settentrionale. Il caso meglio documentato della regione è quello della popolazione tiv della Nigeria, ove nel 1927 lo scambio di sorelle fu abolito dalle autorità coloniali britanniche, le quali lo ritenevano complicato, fomentatore di liti e svantaggioso per le donne. L'abolizione, comunque, non risolse tutti i problemi di cui lo scambio di sorelle era stato ritenuto la causa e, in verità, ne creò dei nuovi. Agli occhi dei missionari, la moralità dei tiv non sembrò trarne vantaggio. D'altro canto, lo scrittore tiv Akiga ha spiegato che lo scambio di sorelle venne più tardi considerato come il fondamento di una perduta moralità. Lo scambio di sorelle era visto come la forma originale di matrimonio da cui la popolazione era stata generata e la condizione per mezzo della quale la casata di un uomo avrebbe potuto ingrandirsi e progredire. Le sue figlie erano distribuite tra i suoi figli perché essi potessero scambiarle con delle mogli, in modo che nessun nome dovesse andar perduto per la casata. Infatti, nella casa del marito una donna era conosciuta col nome della sorella di cui aveva preso il posto, e quella sorella era considerata la vera madre dei figli della moglie. Era presso la porta della vera moglie scambiata che veniva eretto un sacrario a salvaguardia della fertilità delle donne e della terra. Quando lo scambio di sorelle fu abolito e gli uomini accettarono di cedere dietro compenso le loro figlie («con un groppo in gola»), la gente diceva che la terra era stata depredata. I successivi mutamenti economici e sociali, in modo particolare il desiderio di arricchire in fretta che ebbe un effetto deleterio sulla stabilità delle famiglie, furono attribuiti dai tiv (con qualche giustificazione) all'abolizione del matrimonio-scambio.

Un'altra importante regione dell'Africa dove si riscontra un sistema sostanzialmente analogo è quella a nord-est del bacino dello Zaire (Congo). Lo scambio di sorelle era proibito tra gli amba che vivono nella parte più interna dell'Uganda e vicino al regno bantu di Toro, ma la società tiene ancora in considerazione i valori che diedero significato a questo tipo di matrimoni. Esso è ancora praticato dagli mbuti, i cacciatori pigmei della foresta di Ituri. Gli mbuti hanno saltuarie relazioni con gli abitanti stabili dei villaggi bantu, che cercano di estendere il loro controllo sugli scontrosi cacciatori pagando (fra l'altro) una ricompensa per avere in spose le loro donne. Un matrimonio di questo genere, qualunque possa essere l'ammontare della somma che cambia di mano, non è considerato vincolante dagli mbuti. Per essi il solo vincolo permanente è costituito dallo scambio delle sorelle fra loro.

Il caso degli mbuti può essere considerato come paradigmatico della situazione in cui si trovano le popolazioni di confine dell'Africa occidentale e della zona al confine tra Etiopia e Sudan. La sopravvivenza della comunità come tale è legata al fatto che essa riesce a preservare le proprie relazioni di parentela e di matrimonio dalla penetrazione da parte dei sistemi commerciali e finanziari di più potenti società esterne. La sostituzione di una moglie con una sorella è il termine di confronto in una più ampia struttura di produzione e di scambi economici basati sulla reciprocità diretta, che è essa stessa radicata nelle idee di onore, di credibilità e di giustizia.

Gli esempi africani permettono di concludere che, sebbene il matrimonio con scambio di sorelle possa apparire semplice, esso ha radici profonde. Forse, in generale, quelli che appaiono semplici principi di vita sociale hanno una maggior forza morale e perciò vengono conservati assai più a lungo di quanto possiamo immaginare.

# Illusioni e movimento

*Correre in automobile, oppure su un treno, offre frequenti occasioni per osservare fenomeni illusori: la loro spiegazione è possibile applicando il concetto di «costanza percettiva»*

di Mario Farnè

La letteratura sul problema delle illusioni è tra le più abbondanti nel campo delle ricerche percettive. Ciò si spiega col fatto che l'interesse degli studiosi è puntato su di esso fin dalla metà del secolo scorso: fin da quando, in altre parole, è nata la moderna psicologia sperimentale.

Due considerazioni possono giustificare questo impegno. La prima è che gli studiosi, comprendendo e spiegando le illusioni, contano di comprendere e spiegare anche i dati percettivi « normali ». La seconda considerazione è che questi fenomeni sono molto più frequenti di quanto possiamo immaginare. Non dobbiamo infatti credere che « illusioni » siano solo le figurine tanto curiose e più o meno note anche al pubblico di non specialisti (*si veda l'illustrazione in questa pagina*). Di solito, con un atteggiamento così diffuso, quanto ingenuo e superficiale, noi siamo convinti che quello che vediamo sia lo specchio fedele del mondo esterno. Nella realtà, invece, le cose non stanno in questo modo, e le illusioni sono proprio i casi in cui « lo specchio non è fedele » o, detto in termini più precisi, in cui il nostro risultato percettivo non corrisponde con il dato esterno, obiettivo. Ma sono poi tanto numerose queste circostanze? L'importante è guardarci attorno con occhio sufficientemente critico: se cioè riusciamo a vedere in una luce nuova anche i fatti più abituali della nostra vita, ci accorgeremo che essi non sono poi « normali » come credevamo. La conclusione paradossale alla quale potremmo anzi giungere, in un caso del genere, è che « tutto è illusione, anche questo che state leggendo » (come avvisa un cartello entrando nel laboratorio di Richard Gregory, uno dei massimi studiosi del problema, all'Università di Bristol).

Quante volte, in fin dei conti, non siamo riusciti a vedere un oggetto che avevamo proprio lì, sotto i nostri occhi? O a chi è sfuggito, specie al pubblico femminile, il fatto che un vestito nero snellisce più di un vestito chiaro, il quale fa invece sembrare più grossi? E a quale viaggiatore non è mai successo di credere che sia il proprio treno a partire, quando invece si sta muovendo il convoglio fuori dal finestrino? D'altra parte, di fronte a una fotografia come quella riprodotta a pagina 85 in basso a sinistra, abbiamo un senso immediato di profondità: ma quale profondità, dato che si tratta di un'immagine stampata sulla superficie piatta della pagina?

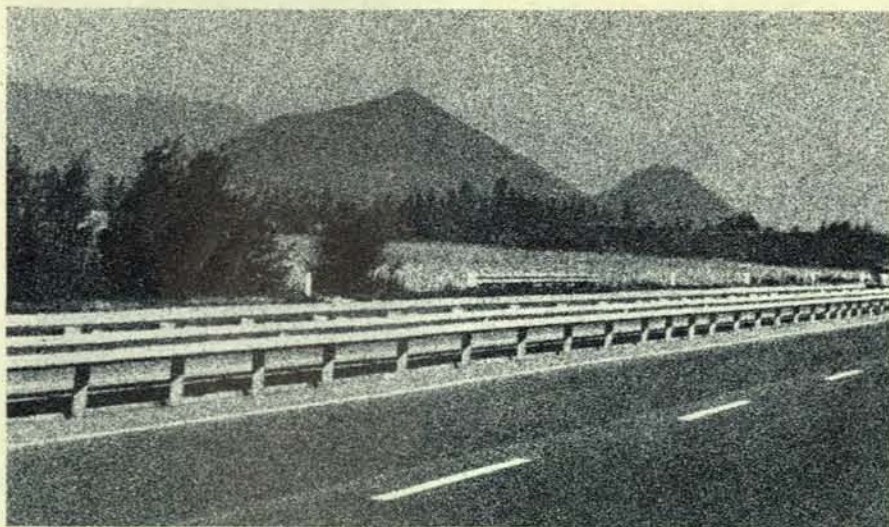
In questa sede esamineremo, più che le astratte semplificazioni da tavolino della figura qui sotto, solo condizioni reali, proprie della nostra esperienza quotidiana. Di conseguenza avremo modo di comprendere non solo quanto spesso i sensi ci ingannino, ma anche quale sia l'importanza pratica degli studi in questo campo. Affinché sia più chiaro il fatto che tali fenomeni appartengono a un'unica categoria, comunque, procederemo per gradi. Consideriamo allora l'illustrazione di questa pagina. Essa ci presenta casi intermedi di illusioni che, pur verificandosi nel mondo attorno a noi, riproducono due condizioni illustrate nella figura della pagina a fronte. Un altro passo avanti lo abbiamo con quanto illustrato nelle figure di pagina 84; qui, inoltre, troviamo dei fenomeni in rapporto diretto con i problemi esaminati nel presente articolo: la percezione della profondità spaziale e del movimento legato a questa.

**Illusioni geometriche antiche e recenti. In (*a*), illusione di Poggendorff, i due segmenti obliqui si trovano su una stessa retta, ma appaiono come su due « gradini » distinti. In (*b*), illusione di Ponzo, i due cerchi sono della medesima grandezza, ma si ha l'impressione che quello a sinistra sia più ampio. In (*c*), illusione della Giovanelli, i dischetti neri, pure essendo ordinati su un'unica linea orizzontale, sembrano a diverse altezze. Queste figure non fanno che semplificare condizioni reali ben più complesse, e sono quindi utili allo studioso che si occupa di ricerche sui fenomeni percettivi cosiddetti normali.**

Gran parte della nostra percezione è percezione dello spazio, o della profondità. Nel cogliere le caratteristiche geometriche e spaziali degli oggetti (cioè, la loro distanza come pure la grandezza, il volume, l'orientamento e così via) noi ci fondiamo su un vasto numero di informazioni. Già dai tempi di Leonardo, per esempio, è noto che « se la cosa seconda sarà tanto distante dalla prima quanto la prima è distante dall'occhio... benché in fra loro siano di pari grandezza, la seconda fia la metà minore che la prima; se la terza cosa sarà di pari distanza dalla seconda... fia minore due terzi, e così di grado in grado per pari distanza faranno sempre diminuzione proporzionata ». Il tipo di informazione che abbiamo in questo caso è noto come « grandezza relativa ». Esso è molto frequente e importante nella nostra esperienza del mondo, anche se talora può portarci a risultati illusori: se la montagna più alta nella fotografia di pagina 84, in alto, è interpretata come più vicina, lo dobbiamo proprio a quanto ci è suggerito dalla grandezza relativa.

Tuttavia molti degli errori che possiamo notare in condizioni statiche scompaiono se noi cominciamo a muoverci; nel caso delle due montagne, quindi, le loro distanze reali (come pure le loro altezze e i loro reciproci rapporti) divengono ben presto evidenti quando ci spostiamo rispetto a esse. Il movimento, d'altra parte, è frequentissimo nella nostra esperienza, ed è alla base delle principali e più veridiche informazioni circa lo spazio tridimensionale (si veda l'articolo dello stesso autore *La tendenza alla terza dimensione* in « Le Scienze », n. 62, ottobre 1973). Eppure, anche con il movimento si osservano casi di ambiguità, o casi in cui le nostre percezioni non sono uno specchio fedele di quanto avviene fuori di noi. Un classico esempio di risultato ambiguo lo abbiamo col mulino a vento (*si veda l'illustrazione a pagina 84, in basso*). Osservandone da lontano la sagoma, ammettiamo che le sue pale si muovano in senso antiorario. Questa rotazione sarà tuttavia interpretata in modo diverso a seconda che l'edificio ci appaia come visto di fronte oppure dal dietro (la condizione ha infatti una prospettiva ambigua, e sono quindi possibili entrambi i risultati): nel primo di questi casi, allora, concluderemo che il movimento è antiorario, mentre nel secondo caso saremo convinti che questo stesso movimento sia di tipo orario, ma rivolto dalla parte opposta alla nostra. In circostanze del genere, l'impressione di una rotazione in senso opposto a quello reale è molto forte: la letteratura ci ricorda perfino l'episodio di un agricoltore che pretendeva di farsi sostituire il mulinello nuovo perché « spesso girava dalla parte sbagliata »! Per quello che riguarda invece le vere e proprie illusioni legate al movimento (anche se non è possibile porre una differenza ben precisa tra ambiguità e illusione) sopra si è già ricordato l'effetto che si ha quando, viaggiando, guardiamo fuori dal finestrino del treno.

In questo articolo, comunque, si desidera puntare l'attenzione su alcuni fenomeni illusori che sono evidenti al massimo quando, con l'automobile o

**L'illusione di Poggendorff e quella di Ponzo, che nella figura precedente sono presentate nella loro forma originaria, sono qui alla base di errori percettivi come si possono avere in condizioni della nostra vita quotidiana. La linea parzialmente coperta dalla matita sembra quindi spezzarsi in due tronconi distinti; le due monete, a loro volta, sembrano di grandezze diverse. Osservando con un atteggiamento critico l'ambiente che ci circonda, abbiamo sempre la possibilità di scoprire casi di percezioni illusorie.**

Nella fotografia in alto, presa sull'autostrada Bologna-Padova in prossimità di Monselice, abbiamo un'illusione di distanza. Il monte basso viene infatti percepito più lontano di quello alto, ma in realtà è vero il contrario. Tale impressione si ha, oltre che di fronte alla fotografia, anche nel caso concreto di chi corre sull'autostrada. In basso, è invece rappresentata una condizione con prospettiva ambigua: il mulino a vento può sembrare come visto sia dal davanti (e la quarta pala sarebbe quindi verso di noi, ma non risalta nella sagoma nera) sia dal dietro (e la quarta pala sarebbe quindi coperta dall'edificio). Con le pale in movimento, pure la direzione di questo è ambigua.

su un treno, corriamo lungo un rettilineo.

Il primo fenomeno fu descritto da Renato Sigurtà nel 1956. Si abbiano, di fronte a noi e a distanze diverse, due pali della luce e supponiamo di avvicinarci a loro cercando di mantenere lo sguardo fisso su quello più vicino (*si veda l'illustrazione a pagina 86, in alto*); esso ci appare senz'altro fermo e di dimensioni invariate (anche se, con l'avvicinamento, l'immagine retinica che ne abbiamo diventa via via più alta), mentre il palo lontano sembra impiccolirsi di parecchio. Questa apparente contrazione si traduce poi in un risultato percettivo di allontanamento; in altre parole, procedendo con rapidità, abbiamo sì l'impressione di avvicinarci al primo palo, che rimane fermo, ma di allontanarci invece dal secondo, come se questo ci fuggisse... Un qualcosa di analogo può essere osservato anche in un esperimento «da camera», con l'aiuto di due semplici matite poste verticalmente davanti a noi.

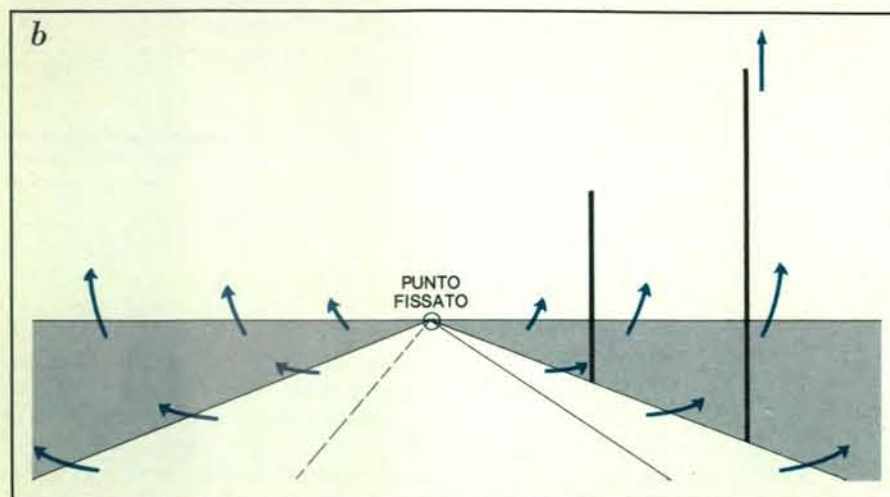
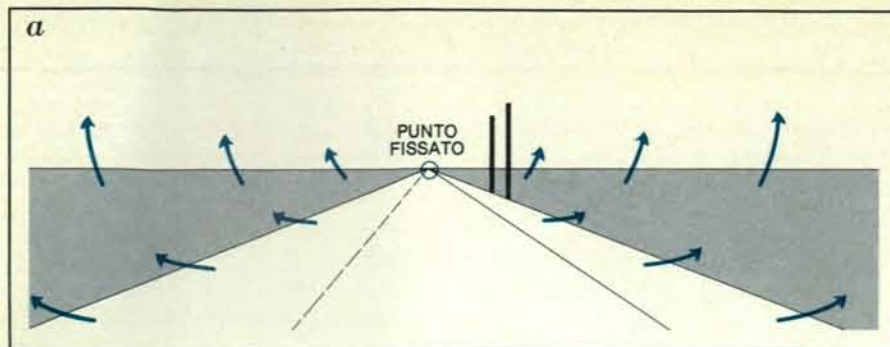
Ma il correre in automobile ci permette di notare molti altri fenomeni strani. Cominciamo con una piccola variazione di quanto già indicato da Sigurtà. Se fissiamo dunque lo sguardo sul palo lontano, invece che su quello vicino, si ha un'inversione del risultato percettivo visto sopra: il palo non fissato sembra quindi ingrandirsi e avvicinarsi a noi con una velocità maggiore di quella reale. Non è però che possiamo considerare i due pali come corpi situati nel vuoto, isolati da tutto il resto dell'ambiente; in realtà essi si trovano su una superficie, il terreno, con caratteristiche ben visibili (grana dell'asfalto, segnaletica orizzontale, ciuffi d'erba, ecc.) e sulla quale si trovano anche molti altri oggetti (guardavie, segnaletica verticale, alberi, case, ecc.), e tutti questi elementi danno un'immagine retinica che muta come risultato della nostra corsa. Di conseguenza, non abbiamo solo due corpi (i due pali) con due velocità, ma un continuo flusso, o gradiente, di velocità, il quale comporta un trasformarsi dell'intero modello stimolante. Puntando allora lo sguardo sull'orizzonte di fronte a noi, dove sembra che i due lati della strada si uniscano, percepiremo un qualcosa in accordo con l'ingrandirsi e il rapido avvicinarsi del singolo palo: cioè una espansione di tutta la parte prossimale della scena (come uno svasamento nel quale ci inoltriamo) e inoltre l'impressione che questa, quanto più avanziamo, tanto più aumenti la velocità con cui viene verso di noi (*si veda ancora l'illustrazione a pagina 86, in alto*). Se poi, continuando a puntare lo sguardo in avanti, facciamo attenzione a quanto avviene nelle due parti estreme della linea dell'orizzonte, ci renderemo conto della presenza di un altro fenomeno. Mentre cioè la zona centrale, quella fissata, rimane stabile, i due lati sembrano allontanarsi di continuo da noi e quasi alzarsi; pure essendo ovvio che anch'essi non si spostano minimamente, si ha quindi l'impressione di una fuga ininterrotta. (Un qualcosa di analogo lo osserviamo con una vite senza fine che gira intorno al suo asse: tutto sembra spostarsi di continuo in una certa direzione, ma è anche evidente che tale spostamento non c'è.)

Fino a questo punto si è parlato di fenomeni osservabili mentre, andando su un veicolo, guardiamo avanti. Nel caso in cui rivolgiamo l'occhio verso quanto avviene fuori dal finestrino laterale, noteremo che i vari oggetti che formano la scena sembrano scorrere in direzione opposta a quella verso cui avanziamo. Questo movimento è tanto meno rapido quanto più l'oggetto guardato è lontano; se esso è all'infinito sembra addirittura immobile. Il fatto che le velocità di scorrimento delle immagini siano diverse ci aiuta notevolmente a giudicare le distanze dei corpi, e ci fornisce un'altra prova di come il movimento sia importante nel percepire lo spazio tridimensionale.

Il fenomeno che si desidera fare notare in questa sede, tuttavia, è un altro. Si punti lo sguardo su un oggetto lontano dal margine della strada, e si osservi criticamente la corsa dei vari punti nell'estensione compresa tra l'oggetto e noi. Potremo allora avere l'impressione che questa corsa avvenga non su linee rette e parallele al nostro tragitto (come è in realtà), ma «arcuate». È, grosso modo, un qualcosa di analogo a quello che si osserva quando stiamo fermi ai margini di una giostra in movimento: i punti, cioè, vengono da lontano, si fanno verso di noi fino a giungere a una vicinanza massima quando giacciono sulla linea perpendicolare alla nostra corsa, e si riallontanano in fretta all'indietro. L'oggetto lontano e sul quale puntiamo lo sguardo corrisponde, nella nostra analogia, al perno della giostra attorno al quale corrono i vari altri oggetti. Anche la velocità con cui questi punti corrono ha dei caratteri peculiari e del tutto analoghi a quanto succede in una giostra. La cosa ci apparirà più chiara da un esame della figura alle pagine 86 e 87 che illustra ciò che vediamo correndo verso sinistra e fissando lo sguardo sul palo più lontano. Le frecce in colore indicano la direzione in cui sembrano spostarsi gli elementi della scena; le loro diverse lunghezze, inoltre, sono proporzionali alle diverse velocità con cui avvengono questi spostamenti apparenti. Il fenomeno «della giostra» può venire notato forse meglio se la linea del nostro sguardo non è perpendicolare alla dire-

Il grafico ci mostra la grandezza dell'immagine proiettata sulla retina oculare, o su una pellicola fotografica, da un medesimo oggetto posto di volta in volta a varie distanze. La funzione è un'iperbole equilatera. Per quanto la stimolazione fisica assuma tante grandezze diverse (*linea in colore*) il risultato soggettivo non varia mai, e in condizioni normali percepiamo quindi un oggetto di grandezza sempre costante (*linea in grigio*).

Una chiara dimostrazione del fenomeno della costanza di grandezza. L'immagine del primo uomo a sinistra è tre volte più grande di quella dell'ultimo della fila (esattamente secondo la linea in colore del grafico in alto); percettivamente, invece, non abbiamo una serie di uomini sempre più piccoli, ma di uomini di circa la stessa altezza (secondo la linea in grigio del grafico in alto) e sempre più lontani da noi. Anche per i binari si nota qualcosa di analogo: l'intervallo tra di essi, nell'immagine, si fa sempre più ridotto, eppure noi li percepiamo paralleli.

In condizioni particolari si può avere un'assenza della costanza. Per esempio, se un oggetto viene isolato dal suo contesto spaziale, e non abbiamo più alcuna informazione circa la sua distanza, allora il risultato percettivo rispecchia quello che è il dato obiettivo dell'immagine: in altri termini, percepiremo secondo la linea in colore del grafico. In questa illustrazione abbiamo il primo e l'ultimo uomo della fila della figura a fianco, ma ci sembra di vedere un individuo normale e un nano. Alcuni trucchi cinematografici si basano su questo principio.

**Altra condizione in cui, correndo su un veicolo, i fenomeni della costanza vengono meno. Generalmente lo scorrere e il deformarsi delle immagini sulla retina sono corretti dalla costanza percettiva; ma se fissiamo un punto all'infinito, o anche sul vetro del nostro veicolo, è più facile cogliere delle « deformazioni di corpi elastici » di contro allo « spostamento di corpi che rimangono costanti ». Le frecce in colore, indicano le illusioni osservabili; alla loro base c'è in gran parte la trasformazione iperbolica del grafico di pagina 85. Si noti infatti quali sono i rapporti tra le altezze dei due pali dalla posizione (*a*) alla posizione (*b*), dopo avere percorso 150 metri. Nella stessa condizione anche le due parti estreme dell'orizzonte sembrano allontanarsi.**

zione della corsa, ma puntata un po' più avanti o indietro.

Come possiamo spiegare tutti questi risultati illusori? Essi hanno in comune il fatto di essere osservabili mentre corriamo su un veicolo, ma anche di riguardare il movimento e la velocità degli oggetti fuori del nostro veicolo. Pure la spiegazione è in gran parte comune e fa ricorso a una categoria di fenomeni noti come « fenomeni della costanza percettiva ».

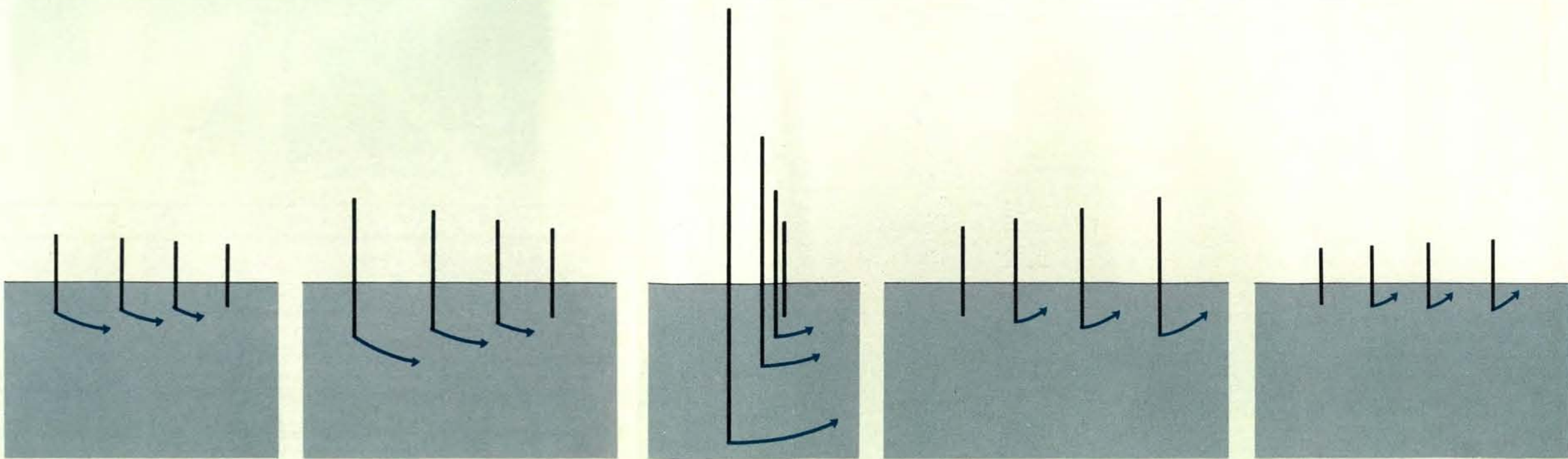
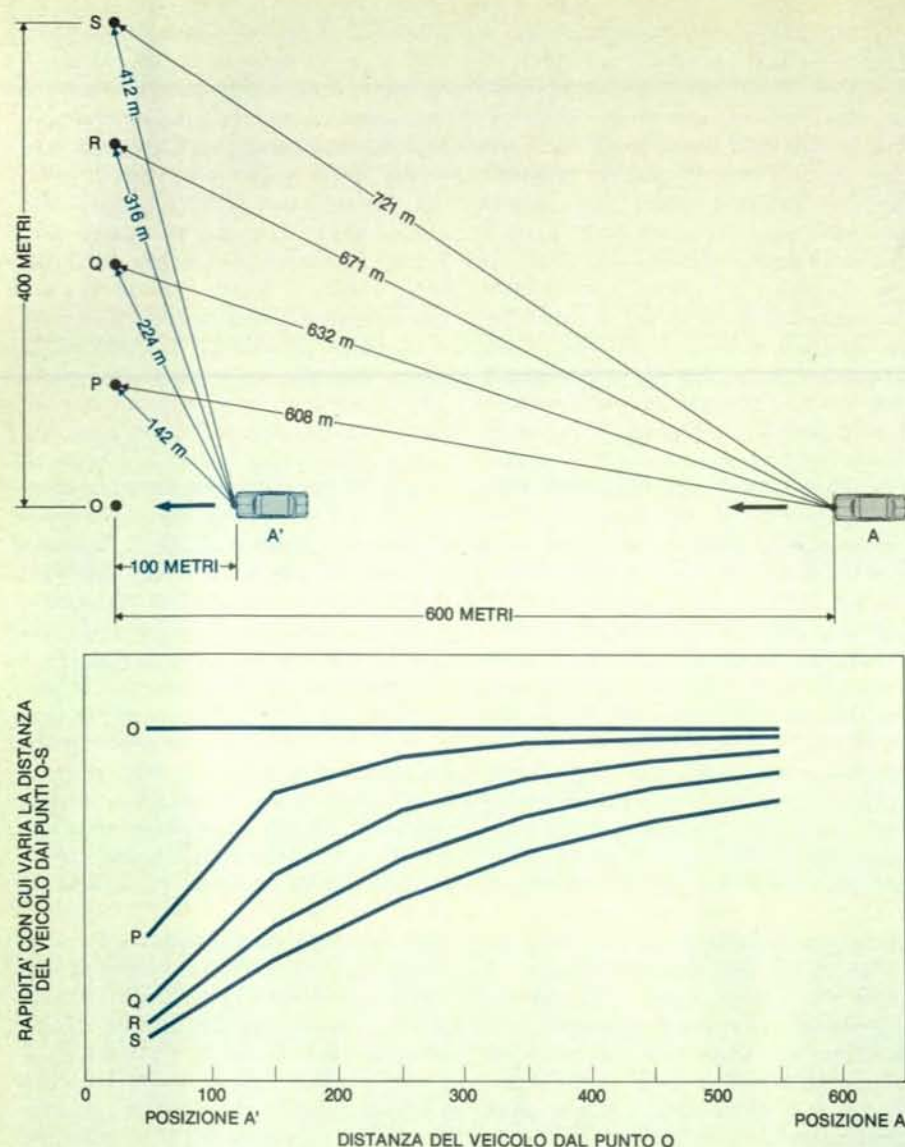
Qualsiasi oggetto proietta sulla retina oculare, come pure su una pellicola fotografica, un'immagine di una data grandezza. Quanto più lontano è posto l'oggetto, tanto più piccola sarà l'immagine proiettata: come ci dimostra la figura di pagina 85 in alto (e come era già stato descritto da Leonardo) tale rimpicciolimento dell'immagine in funzione della distanza non è lineare, ma ha un andamento secondo un'iperbole equilatera. Sappiamo bene, però, che il risultato percettivo è diverso: in altre parole, solitamente non ci sembra di avere tanti oggetti di misure diverse, ma un unico oggetto che è sempre uguale e che si trova a varie distanze. Il fenomeno per cui la grandezza percepita è proporzionale a quella dell'oggetto, nonostante i cambiamenti che essa subisce a livello dell'immagine retinica, è noto come « costanza della grandezza » (*si veda l'illustrazione a pagina 85, in basso a sinistra*).

Supponiamo poi che il nostro oggetto, invece di rimanere immobile, cominci a spostarsi con moto rettilineo e uniforme avvicinandosi a noi. In un caso del genere l'immagine proiettata sarà in continua trasformazione, espandendosi sempre di più. Per lo stesso motivo visto sopra, poi, questa espansione non è proporzionale all'avanzamento spaziale, e quindi al tempo, ma avviene secondo una legge iperbolica (*si veda ancora la figura di pagina 85, in alto*). Anche in questo caso, comunque, agisce la tendenza alla costanza della grandezza con un qualcosa in più: viene quindi percepito un oggetto di dimensioni invariate e che si muove nello spazio con velocità uniforme.

In occasioni particolari, non di meno, la costanza percettiva è debole o manca del tutto, e il mondo assume quindi una fisionomia un po' strana. Se per esempio isoliamo il nostro oggetto dal resto dell'ambiente, in modo che ci appaia come sospeso nel vuoto, è già più difficile comprenderne la grandezza: in tal caso anche la nostra familiarità con questo oggetto, e la conoscenza delle sue dimensioni, non sono sufficienti per evitarci un'illusione (*si veda la figura* a *pagina 85, in basso a destra*). Un'altra situazione in cui la costanza viene meno è quella della visione periferica, o non foveale, di corpi in movimento.

Torniamo allora al caso dei due pali al margine della strada e ai quali ci avviciniamo di corsa. Come abbiamo visto, quando ad esempio fissiamo quello lontano (e la sua immagine si proietta sulla retina in zona foveale) ne abbiamo una costanza perfetta. Nell'altro palo invece, quello vicino, cogliamo le deformazioni che normalmente, per il fenomeno della costanza percettiva, ci sfuggono: e abbiamo così l'impressione del suo rapido allungamento e avvicinamento. Ma in realtà, a livello della retina, le cose stanno proprio in questi termini. Vediamo infatti cosa succede (*si veda* « a » *nella figura della pagina a fronte*). Poniamo che tra i due pali ci sia una distanza di 50 metri. Se inizialmente siamo a 250 metri dal secondo palo (quello fissato) e a 200 dal primo, a mano a mano che ci avviciniamo a essi le loro immagini retiniche aumentano progressivamente, ma in modo diverso: cosicché, secondo la legge iperbolica riassunta nel grafico della figura di pagina 85, in alto, mentre all'inizio l'immagine del primo palo supera di poco quella del secondo (esattamente di 1/5), arrivati a 50 metri dal primo palo, e a 100 dal secondo, tale immagine ne è diventata il doppio (*si veda* « b » *nella figura della pagina a fronte*). Le variazioni dell'immagine del palo non fissato (immagine che si proietta sulla retina in zona relativamente lontana dalla fovea) non vengono « corrette » bene dal fenomeno della costanza e questo porta al risultato paradossale visto sopra. La stessa interpretazione vale per l'espandersi di tutta la parte prossimale della scena: quello che avviene per i due pali, avviene infatti per qualsiasi coppia di punti che si trovano nel campo visivo.

Vediamo ora come si può interpretare l'illusorio « allontanamento » dei due lati dell'orizzonte e il fenomeno « della giostra ». Oltre alla costanza della grandezza, possiamo notare una « costanza di posizione »: quando ci muoviamo, le immagini dei vari corpi si spostano nella nostra retina (oltre che espandersi o contrarsi), ma normalmente il risultato percettivo è quello di corpi fissi nello spazio (oltre che di grandezza immutata). Anche in questo caso non di meno, e sempre in condizioni di visione periferica, la costanza può mancare. Questo ci spiega l'effetto di velocità sempre più elevata con cui il palo, o la parte prossimale della scena, ci viene incontro, ma è osservabile particolarmente bene con dei punti disposti lungo una fila perpendicolare alla direzione della nostra corsa. La figura di pagina 88 può aiutare il lettore a comprendere quanto verrà esposto. Supponiamo che i punti *O*, *P*, *Q*, *R* ed *S* siano posti a 100 metri l'uno dall'altro (l'intervallo *O-S* è quindi di 400 metri), e che il nostro veicolo si sposti da una posizione *A* che è a 600 metri da *O*, a una posizione *A'* che dista da *O* solo 100 metri. È ovvio che con questa corsa si ha un accorciamento della distanza non solo dal punto *O*, verso il quale ci dirigiamo, ma da ciascun punto della serie *P-S*. Questo accorciamento avviene tuttavia in modo particolare: mentre infatti nella posizione *A* la distanza da *S*, per esempio, è di 721 metri, e cioè 1,20 volte la distanza da *O*, nella posizione *A'* la distanza da *S* è di 412 metri, e cioè 4,12 volte la distanza da *O* (*si veda la figura a pagina 88, in alto*). Relativamente a *O*, quindi, la nostra distanza dal punto *S* aumenta a mano a mano che corriamo avanti. Per quanto riguarda gli altri punti, si

**Alla base del fenomeno « della giostra » abbiamo una seconda circostanza: quella secondo cui gli oggetti che si trovano a distanze diverse (poniamo i punti della serie *P-S* dell'illustrazione di pagina 88, che qui sono rappresentati come pali) esibiscono proiezioni prospettiche diverse a mano a mano che noi avanziamo verso sinistra. Anche in questo caso il risultato illusorio emerge con il mancare delle « correzioni » dovute alla costanza percettiva e con l'assumere, da parte nostra, un atteggiamento critico. Quest'ultimo è particolarmente importante perché ci permette di cogliere fenomeni che altrimenti passano inosservati, e di renderci conto che le illusioni sono molto più numerose e diffuse di quanto immaginiamo. Le frecce indicano la direzione e la velocità dei movimenti visti nei vari oggetti della scena.**

**L'apparente allontanamento delle due parti estreme dell'orizzonte può essere spiegato col fatto che, correndo con l'automobile da *A* ad *A'* verso il punto *O*, la nostra distanza relativa dai punti della serie *P-S* diminuisce sempre meno (*grafico in alto*). Infatti, mentre la distanza da *O* si accorcia di 6 volte, la distanza da *P* si accorcia di 4,28 volte, quella da *Q* di 2,82 volte, quella da *R* di 2,12 volte e quella da *S* di sole 1,75 volte. Mentre ci avviciniamo quindi a *O* con una velocità costante (*grafico in basso*), la rapidità con cui ci spostiamo rispetto agli altri punti è sempre più bassa e via via diminuisce, approssimandosi a zero, all'avvicinarsi del veicolo al punto *O*. Questo dato può in parte spiegarci il fenomeno « della giostra », osservabile guardando lateralmente.**

può notare che l'aumento relativo della loro distanza da noi è tanto minore quanto più essi sono vicini a *O*. Lo stesso fenomeno può anche essere descritto dicendo che la rapidità con cui varia la distanza tra noi e i punti della serie *P-S* diminuisce con il nostro avanzamento, ed è tanto più limitata quanto più essi sono lontani da *O* (*si veda l'illustrazione in questa pagina, in basso*). Se consideriamo un punto lontanissimo (molto oltre il punto *S*), la nostra distanza da questo sembra quasi rimanere invariata.

In genere questi fenomeni vengono corretti dalla costanza percettiva e, nella nostra corsa, non ci accorgiamo che lo spazio che ci separa dai vari punti cambia in modo tanto diverso. Se la costanza viene meno, invece, riusciamo a percepire le cose come è stato descritto sopra. Correndo quindi in avanti e fissando il punto *O* (*si veda la figura in questa pagina, in alto*), gli altri punti rimangono in visione periferica e coglieremo il loro relativo allontanamento: le due parti estreme dell'orizzonte, in questo caso, sembrano spostarsi sempre più avanti. Guardando invece lateralmente e fissando il punto *S*, rimangono periferici i punti prossimali e coglieremo le loro « velocità di avvicinamento » sempre più elevate (*si veda la figura in questa pagina, in basso*): in questo caso è evidente il fenomeno « della giostra ». A esso contribuisce, inoltre, un secondo fattore. È ovvio che la prospettiva con cui vediamo gli oggetti posti su piani differenti varia con il variare della nostra posizione. L'immagine retinica che ne risulta esibisce allora una deformazione continua e secondo modelli particolari (*si veda la figura alle pagine 86 e 87*); quando essa non è centrale nella nostra visione, e l'effetto della costanza è quindi più debole o assente, ci è dato di cogliere due eventi legati a questa deformazione: l'impressione che gli oggetti si spostino lungo percorsi arcuati, invece che paralleli al nostro (perché di fatto, mentre corriamo, la loro immagine si sviluppa secondo linee curve), e una velocità sproporzionatamente più alta da parte degli oggetti vicini in confronto a quelli lontani (perché l'immagine degli oggetti vicini aumenta con un tasso molto più elevato, come è chiaramente visibile dalla successione della figura alle pagine 86 e 87). Il secondo evento si aggiunge a quello esposto sopra, rendendo perciò meglio percepibile l'impressione delle velocità diverse con cui scorrono i vari oggetti. E tutto questo è proprio come si ha con una giostra in movimento.

Generalmente, la nostra percezione è in accordo più con quanto c'è fuori di noi, nel mondo fisico, che con quanto si proietta sulla retina oculare. In questo articolo abbiamo invece visto alcuni casi in cui quello che percepiamo riflette pari pari l'immagine retinica e le sue deformazioni. L'assenza della costanza è una delle condizioni più importanti per giungere a questo risultato illusorio: il « nano » della figura di pagina 85 in basso a destra, come l'« espandersi » della parte prossimale della strada o il fenomeno « della giostra », osservati correndo su un veicolo, sono chiari esempi di ciò. Abbiamo esaminato in particolare alcune circostanze evidenti mentre si viaggia con l'automobile. È d'altra parte ovvio che, per comprendere a fondo la guida, bisogna analizzare l'informazione visiva che riceviamo; ed è ugualmente ovvio che, per migliorare la nostra percezione delle cose e giungere quindi anche a una guida più sicura, bisogna conoscere quali sono gli stimoli necessari e validi. Eccoci quindi tornati al motivo, con cui abbiamo iniziato l'articolo, dell'utilità pratica di studiare le illusioni e la percezione in genere. I progressi fatti sono enormi. Per quanto tuttavia il movimento sia un fenomeno comunissimo e di importanza fondamentale nella nostra vita quotidiana, le ricerche in questo campo sono iniziate da poco, e i problemi oscuri e da risolvere si presentano ancora molto numerosi.

# Le vespe della sabbia australiane

*Le specie australiane del genere* Bembex *sono molto differenziate probabilmente perché si sono evolute in modo da occupare nicchie ecologiche che, in altri continenti, sono proprie di generi diversi*

di Howard E. Evans e Robert W. Matthews

Gli aborigeni australiani, del tutto ignari di quella grande sovrastruttura che chiamiamo ecologia, vivevano in un tale grado di intimità con la natura che l'uomo moderno bèn difficilmente potrebbe sperare di raggiungere. Per gli aborigeni ogni essere vivente aveva un suo significato preciso, a volte come oggetto di cibo a volte come simbolo del passato o presagio del futuro: per esempio, uno dei loro canti cerimoniali, accompagnato dal battito di bastoni e dalle profonde note del *didjeridu* (un grande piffero di legno), era dedicato a un insetto delle loro regioni aride, il *woiju*, una specie di vespa della sabbia. Il *woiju*, dice la canzone, scava un buco nel terreno; non è buono da mangiare, ma non si deve temere: anzi si deve venerare perché è strettamente collegato alla terra, da cui provengono tutti i viventi e a cui tutti ritornano.

Un viaggiatore che attraversi le regioni interne del continente australiano, anche se osserva solo distrattamente la vita animale che lo circonda, presto si rende conto del numero notevole di vespe della sabbia: dovunque si scorgono grandi distese di sabbia, perforate dalle loro tane e brulicanti del loro andirivieni. Tuttavia queste vespe non sono esclusivamente australiane: appartengono al genere *Bembex,* ben noto agli entomologi di tutto il mondo.

A differenza degli insetti sociali, come le formiche, le api e le vespe comuni, la vespa della sabbia è una creatura solitaria. I maschi scavano una tana per dormire, che penetra nella sabbia con un angolo compreso tra 20 e 40 gradi, e formano una piccola montagnola all'entrata: anche le femmine che non hanno un nido d'incubazione scavano una tana-dormitorio: spesso le due tane del maschio e della femmina stanno una accanto all'altra. Sia i maschi sia le femmine si cibano del nettare dei fiori o di altre sostanze zuccherine prodotte dalle piante e dai frutti. Il maschio non è predatore, mentre la femmina cattura una preda per alimentare le larve nel nido.

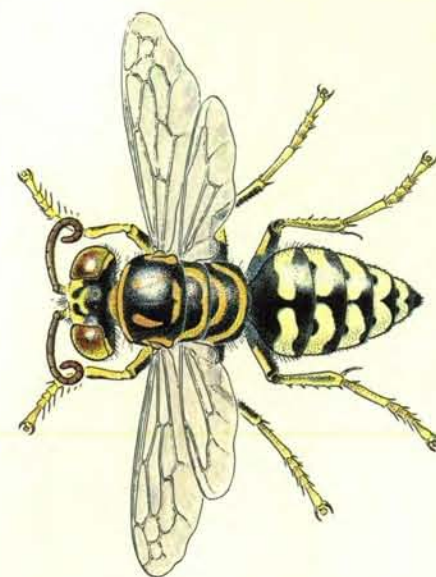
In seguito a studi compiuti su specie di *Bembex* dell'America settentrionale, si è scoperto che tutti questi insetti dimostrano modelli stereotipati di comportamento: ma ciascuna specie possiede una propria caratteristica variazione di questi modelli, particolarmente evidente nella costruzione del nido d'incubazione. Tutte le vespe della sabbia dell'America settentrionale cacciano esclusivamente insetti dell'ordine dei ditteri.

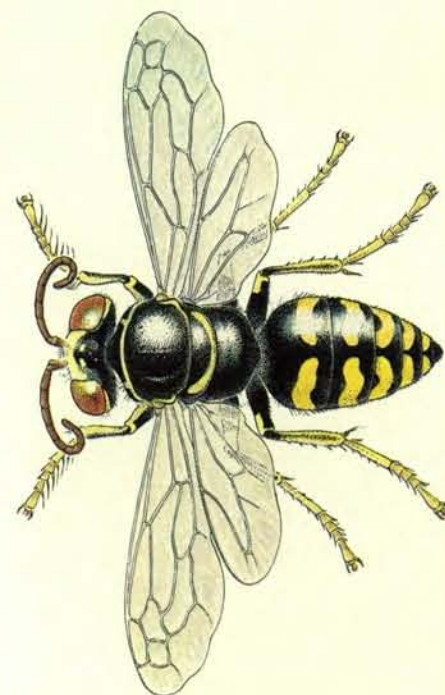
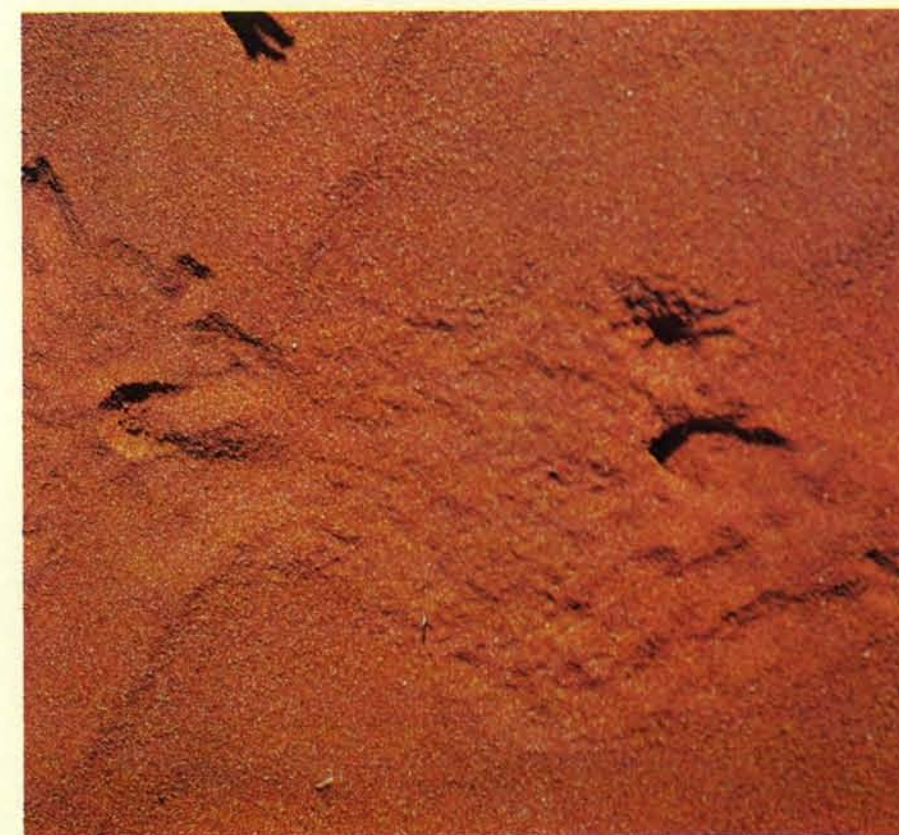
Esistono buone ragioni per credere che il genere *Bembex* sia originario dell'America settentrionale: infatti in questa zona esistono tutti i generi strettamente affini a questo. In tempi geologicamente recenti uno o più ceppi presumibilmente raggiunsero l'Eurasia e l'Africa, dove proliferarono. Nell'America settentrionale ne esistono 23 specie, nell'Eurasia e nel Nordafrica più di 50, mentre circa 90 specie sono state trovate nell'Africa a sud del Sahara. Il genere *Bembex* si è anche insediato nell'America meridionale, ma in questa zona è stato in gran parte sostituito da altri generi della sottofamiglia bembecini. Le specie australiane sono derivate probabilmente da parecchi ceppi separati, giunti attraverso le isole delle Indie Orientali.

Quando abbiamo iniziato le nostre ricerche, il numero di specie di *Bembex* registrate in Australia era di circa 35. Grazie all'appoggio fornito dalla National Science Foundation e con la cooperazione di molte istituzioni e di molte persone abbiamo potuto osservare il comportamento di nidificazione delle vespe della sabbia per circa 12 mesi durante le estati del 1969 e del 1972. Pur ottenendo dati riferibili al comportamento di sole 20 specie, ne abbiamo potuto identificare e classificare in tutto 80: poiché parecchie sono note solo per alcuni esemplari, è probabile che ve ne siano altre da scoprire.

Come mai esiste un così gran numero di specie di *Bembex* in Australia, continente con poche barriere naturali e con paesaggio molto uniforme, piuttosto che nell'America settentrionale dove esiste un'enorme varietà di ambienti? Come vedremo in seguito, molte specie australiane sono uscite dai limiti comportamentali caratteristici delle specie affini che vivono nell'America settentrionale: la conseguenza di questo fenomeno si è manifestata sotto forma di un'inaspettata gamma di adattamenti.

Le specie australiane di *Bembex* si possono dividere in due gruppi principali: specie grandi con individui in genere più lunghi di 16 mm e specie piccole, di dimensioni minori. Come le vespe della sabbia dell'America settentrionale, che si possono tutte considerare appartenenti al gruppo delle grandi vespe, le vespe australiane di grandi dimensioni tendono a segregarsi secondo le diverse specie, sia dal punto di vista geografico che da quello ecologico. In ogni località, cioè, si trova di solito una singola specie: è raro che si trovino due o più specie diverse che vivono l'una accanto all'altra. Le vespe della sabbia australiane di grandi dimensioni vivono principalmente lungo le coste orientali e occidentali del continente. Si trovano nelle dune costiere, nelle strisce sabbiose lungo i corsi d'acqua, nei pendii ghiaiosi erosi e in altri habitat; inoltre, come le specie affini nordamericane, cacciano esclusivamente ditteri e costruiscono nidi d'incubazione semplici.

Le vespe della sabbia di piccole dimensioni invece si trovano sui crinali sabbiosi delle regioni interne aride dell'Australia. Questi insetti si dimostrano, sotto moltissimi aspetti, atipici rispetto agli altri appartenenti al loro genere. Regolarmente abbiamo trovato fino a sei specie che nidificano l'una accanto all'altra in una duna di sabbia e, in alcune locali-



A sinistra è raffigurata la femmina della vespa della sabbia della specie *Bembex littoralis,* di lunghezza variabile tra 10 e 15 millimetri. La specie è diffusa praticamente in tutto il continente australiano. Nella fotografia a destra appare il nido d'incubazione costruito dalla femmina, caratteristico della specie. Il monticello è lungo da 11 a 17 centimetri e alto circa 2 cm.

*Bembex variabilis,* una specie assai diffusa in Australia, disperde la montagnola formata dal materiale di scavo del nido lasciando sul terreno un caratteristico disegno a zig-zag (*a destra*). Le femmine di *B. variabilis* (*a sinistra*) hanno una lunghezza che varia tra 9 e 16 millimetri. La specie si è particolarmente adattata alla vita su grandi estensioni di sabbia.

Una vespa della specie *Bembex palmata* mentre trasporta un dittero entro il proprio nido d'incubazione. La femmina depone un uovo sopra il primo insetto trasportato nel nido, poi ne trascina altri per fornire nutrimento alla larva che si sviluppa. La femmina di *palmata* costruisce il nido nella sabbia grossolana e nella ghiaia. La specie è di grandi dimensioni: le femmine possono raggiungere i 14-20 millimetri.

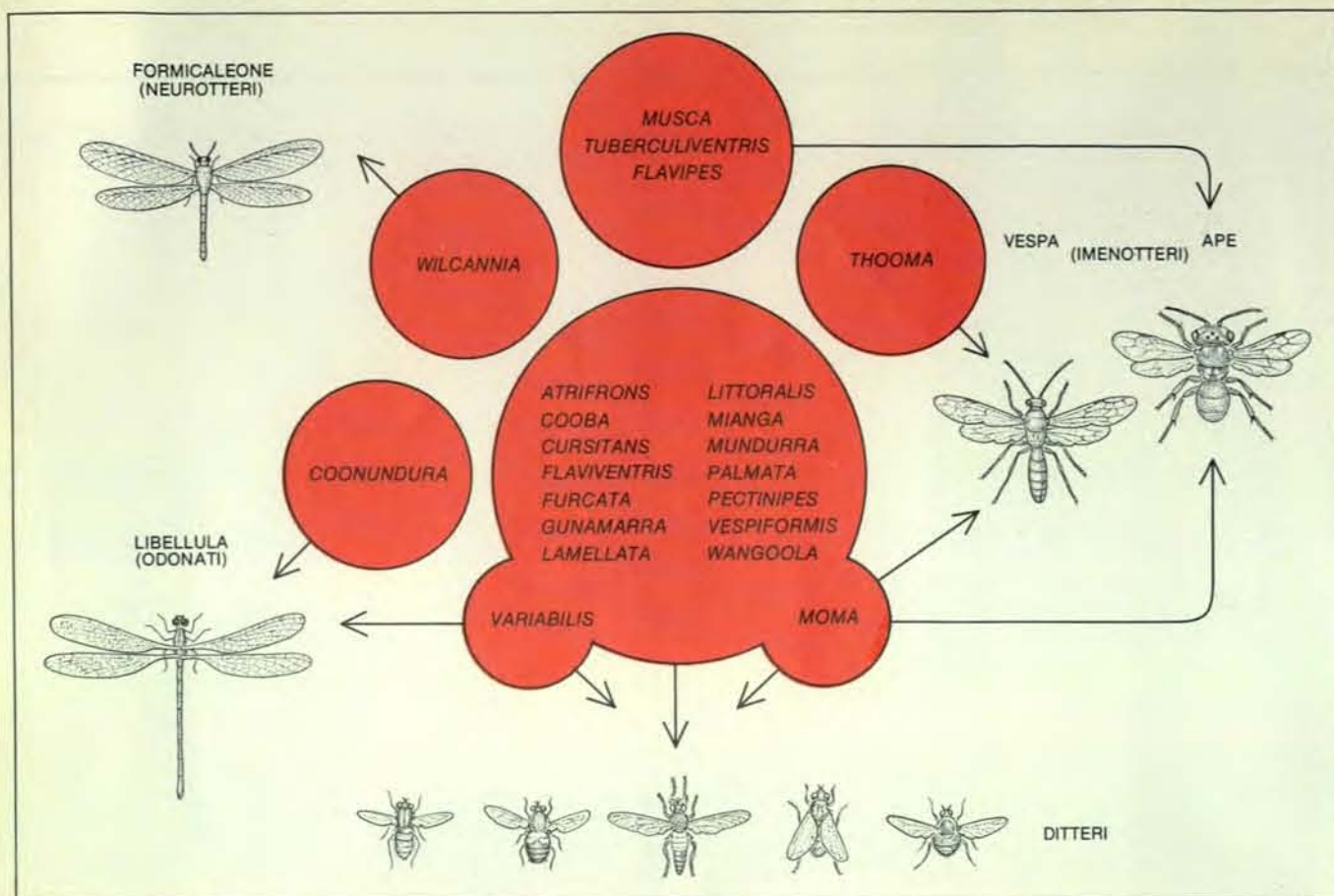
La femmina di *Bembex variabilis* cattura prede assai diverse a seconda delle varie regioni australiane in cui vive: in quasi tutto il continente va a caccia di insetti dell'ordine dei ditteri (*fotografia in alto*). Tuttavia in alcune parti dell'Australia settentrionale esistono popolazioni di *variabilis* che preferiscono catturare odonati (le comuni libellule): è presumibile perciò che questa specie sia in uno stadio di transizione evolutiva.

tà, abbiamo potuto raccogliere fino a 20 specie. Alcune delle specie sono così simili per dimensioni e colore che è difficile distinguerle: tuttavia è possibile classificarle in base al tipo di nido d'incubazione. Dopo aver acquisito un po' d'esperienza, abbiamo scoperto che era più facile identificarne alcune grazie all'aspetto esterno del nido.

*Bembex* è un genere molto esteso e perciò l'uso dei nomi convenzionali latini per indicare le nuove specie presenta alcuni inconvenienti: abbiamo trovato, per esempio, molto fastidioso il fatto che ad alcune specie molto caratteristiche dell'Australia siano stati dati nomi facilmente confondibili come *flavifrons, flavipes,* e *flaviventris.* Quindi abbiamo scelto per le nuove specie i nomi indigeni, che ci sono sembrati appropriati e di suono armonioso, per esempio *coonundura* (da *coon undura,* ossia donna libellula in una leggenda indigena), *burraburra* (parola indigena che significa rapido), *goyarra* (che nel dialetto degli aborigeni occidentali, significa sabbioso) e *wangoola* (che significa scavare nel dialetto degli aborigeni del Nuovo Galles del Sud). Questi nomi sono stati proposti come attributi specifici dopo il nome generico *Bembex,* che deriva dal greco e significa «insetto ronzante».

La maggior parte delle specie più piccole delle vespe della sabbia australiana va a caccia di ditteri, come le vespe affini di maggiori dimensioni. Invece alcune specie si sono specializzate nel dar la caccia ad altri insetti e in tal modo evitano la competizione per le prede.

Nel 1931 William Morton Wheeler dell'Università di Harvard scoprì sui crinali sabbiosi attorno al lago Violet, nell'interno dell'Australia occidentale, una specie di *Bembex* che andava a caccia di insetti dell'ordine odonati (libellule) anziché di ditteri. Uno dei nostri primi obiettivi fu quello di tentare di confermare questa scoperta di Wheeler. Ma quando visitammo il lago Violet, la zona si presentava del tutto inaridita e non trovammo affatto libellule. (Si pensa che le libellule immature rimangano in uno stadio di quiescenza, sprofondate nel terreno sotto questi laghi del deserto che spesso restano asciutti per parecchi anni.) Mentre stavamo scavando per portare allo scoperto vecchi nidi, abbiamo trovato cellette contenenti i resti di libellule e bozzoli vivi di vespe della sabbia: inumidendo tali bozzoli abbiamo potuto allevare vespe della medesima specie (*coonundura*) di quella raccolta da Wheeler.

Al lago Violet abbiamo anche scoperto una vespa della sabbia che andava a caccia di vespe della famiglia tinnidi. Abbiamo chiamato la nuova specie

In questo schema sono raffigurate le preferenze alimentari di 22 specie australiane di *Bembex*: come si può osservare, la maggior parte va a caccia di ditteri. Due specie, *variabilis* e *moma*, appaiono in uno stadio di transizione evolutiva; vanno a caccia di insetti di vari ordini. Le rimanenti sei specie si sono specializzate nella caccia a ordini d'insetti diversi dai ditteri.

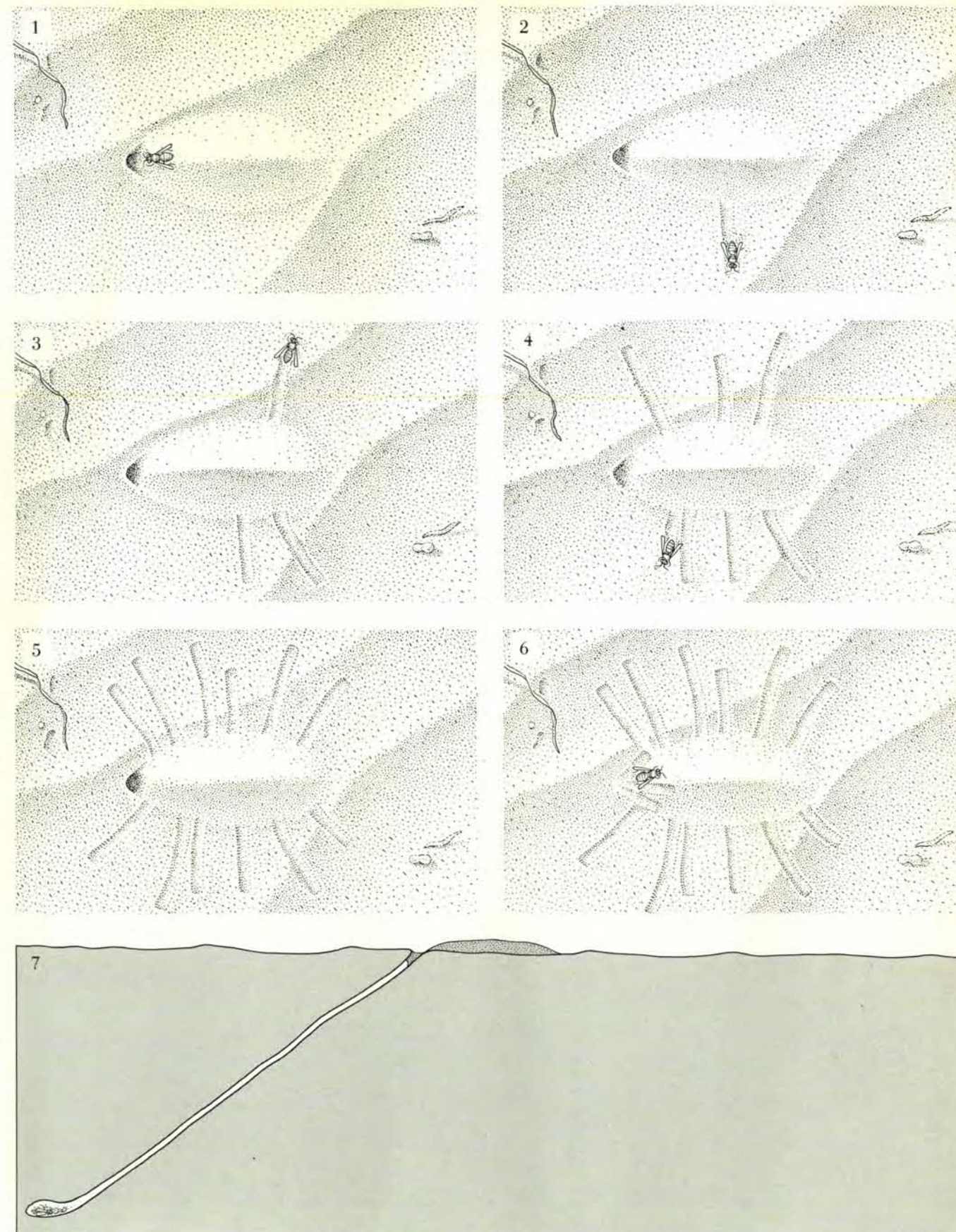
*thooma,* da un vocabolo indigeno che indica le creature delle dune del «cerchio dei sogni». In seguito abbiamo trovato a più di 1500 chilometri di distanza la medesima specie che cacciava esattamente lo stesso tipo di vespa. Questo era il primo di molti esempi di costanza di preda in una specie, costanza che non è invece affatto rispettata nell'ambito del genere.

In seguito abbiamo potuto compiere altre sorprendenti scoperte: una specie, che l'entomologo austriaco Anton Handlirsch aveva chiamato *musca* (nome che ci appare del tutto inadatto), cacciava esclusivamente, come abbiamo potuto chiarire, api sociali prive di pungiglione del genere *Trigona*. In seguito abbiamo scoperto altre due specie affini di vespe della sabbia che andavano anch'esse a caccia di api prive di pungiglione.

Se è vero che il genere *Bembex* in Australia si è evoluto in modo da occupare nicchie alimentari occupate in altre zone da altri generi, potevamo sperare di trovare alcune specie di *Bembex* in uno stadio transitorio. Abbiamo, infatti, scoperto due specie in tale stadio e pensiamo ne esistano altre. *Bembex moma* è assai frequente nella zona di Darwin, ma si trova anche in molte zone dell'interno dell'Australia. (*Moma* è una parola indigena che significa spettro e allude alla pallida macchiettatura di questa specie, che le permette di mimetizzarsi sopra la sabbia.) Già al nostro primo incontro con questa vespa della sabbia, ci siamo accorti che andava a caccia sia di vespe, sia di api. In un nido di *moma* abbiamo persino trovato una femmina morta di una specie di *Bembex* di dimensioni maggiori. In seguito, nel Territorio del Nord abbiamo scoperto che alcuni individui della specie *moma* vanno a caccia anche di ditteri: poiché le prede normali di *Bembex* sono ditteri, crediamo che *moma* sia in uno stadio di transizione, e che stia estendendo la sua gamma di possibili prede alle api e alle vespe. Presumibilmente *musca* è passata attraverso uno stadio analogo, prima di specializzarsi nella caccia alle api prive di pungiglione.

Il secondo esempio di una specie in trasformazione è *variabilis*. Abbiamo studiato questa specie in 20 località in cinque stati e due territori, compilando circa 370 registrazioni di prede e abbiamo trovato che le femmine di *variabilis* vanno a caccia almeno di 14 diverse famiglie di ditteri: inoltre nel Territorio del Nord, presso Darwin, *variabilis* caccia sia libellule sia ditteri; infine, lungo il fiume Ord circa 500 chilometri a sud-est di Darwin, abbiamo scoperto nidi di *variabilis* che contenevano solo spoglie di libellule.

Durante la stagione arida, nell'Australia settentrionale, *variabilis* nidifica solo presso le acque perenni, dove spesso le libellule sono numerose. Condivide l'habitat di nidificazione con un'altra specie comune, *littoralis*, predatrice esclusiva di ditteri. La vespa *variabilis*, poiché va a caccia di libellule, non solo evita di competere con *littoralis* per il numero limitato di ditteri a disposizione nella stagione arida, ma riesce anche a utilizzare una preda di dimensioni molto maggiori. Per far sì che una larva si nutra abbastanza per giungere a maturità occorrono circa 40-50 ditteri, mentre sono sufficienti 20-25 libellule.

Tra le femmine delle diverse specie di vespe della sabbia della zona interna dell'Australia si possono notare caratteristiche differenze nelle modalità di costruzione del nido. Una delle più singolari consiste nel metodo adottato dalla vespa femmina per modificare il monticello di sabbia accumulato all'imboccatura della tana che porta al nido d'incubazione. La femmina di *variabilis*, per esempio, co-

In questa illustrazione è raffigurato il comportamento della femmina di *Bembex littoralis* nella costruzione del nido. Per prima cosa la femmina scava la tana (*1*). Quando ha terminato di costruire il cunicolo e la camera d'incubazione, la femmina retrocede salendo sul monticello di sabbia, compie un giro di circa 90° e si sposta giù per il pendio del monticello, scavando sabbia e accumulandola sopra di esso (*2*). Poi compie un piccolo volo, atterra all'entrata della tana e ripete tutti i movimenti precedenti per aumentare l'altezza della montagnola (*3* e *4*): alla fine il crinale di sabbia formatosi presenta caratteristici solchi su entrambi i lati (*5*). La vespa sigilla poi l'ingresso del nido, creando parecchi altri solchi più brevi, che si irradiano da esso (*6*). Nell'ultima illustrazione sono raffigurate in sezione la lunga tana e la camera d'incubazione.

struisce il nido nella sabbia sia sul piano che in pendenza: la tana raggiunge la profondità di 20-40 centimetri; è piuttosto incurvata e talvolta compie un gomito, in modo che la camera d'incubazione risulta pressoché al di sotto dell'entrata. Il diametro della tana è di 7-8 millimetri; la camera d'incubazione, un poco più grande, ha un diametro di 9-12 millimetri e una lunghezza di 6-12 centimetri.

La femmina, dopo aver completato la tana e la camera d'incubazione, disperde il monticello che ha accumulato presso l'entrata del cunicolo, formando un disegno caratteristico costituito da linee a zigzag sulla sabbia (*si veda la figura in questa pagina*). Nelle vicinanze scava un breve cunicolo cieco, che viene lasciato aperto; talvolta aggiunge alla costruzione altre false tane.

La vera tana resta sempre chiusa, salvo quando la femmina vi sta trascinando una preda. A differenza della maggior parte di specie australiane di *Bembex*, che depongono l'uovo direttamente sul corpo della prima preda portata nel nido, la femmina di *variabilis* fa aderire il suo uovo a parecchi granelli di sabbia all'interno della camera d'incubazione.

Il giorno in cui depone l'uovo, la femmina di *variabilis* non porta alcuna preda nel nido, ma il giorno dopo ne depone una o due accanto all'uovo. Nei giorni successivi vi trascina altre prede e le deposita disponendole approssimativamente in una singola fila, lungo la camera d'incubazione; continua così a far provviste di cibo anche dopo che l'uovo si è schiuso. La larva progressivamente divora le prede che si trova di fronte; quando la larva è quasi completamente sviluppata, la femmina ammassa nella tana molta sabbia, chiudendo l'uscita superficiale del cunicolo. La larva, che rimane nella camera d'incubazione, quando è completamente cresciuta, si tesse attorno un bozzolo in cui riposa finché sarà pronta a emergere come insetto perfetto.

La femmina di *Bembex variabilis* costruisce il nido d'incubazione sulla sabbia pianeggiante o in lieve pendio, spesso proprio accanto ai nidi di altre specie di *Bembex*, per esempio di *littoralis*. La tana è lunga da 20 a 110 centimetri e spesso presenta curve; la sabbia estratta forma un monticello allungato (*1*). Quando ha terminato di costruire il cunicolo e la camera d'incubazione, la femmina atterra sull'estremità opposta della montagnola di sabbia e si mette a lavorare da qui verso l'apertura del nido, andando da un lato all'altro della montagnola e raschiando la sabbia vigorosamente (*2*). Poi compie un altro piccolo volo, atterra, e ripete l'operazione solcando la montagnola da un lato all'altro su percorsi leggermente diversi. Compie nuovamente tutta la sequenza di movimenti (*3*) finché non ha completamente disperso la montagnola, lasciando al suo posto un caratteristico disegno a zigzag: l'apertura del rifugio è ricoperta di sabbia. Alla fine la femmina atterra sul lato posteriore della montagnola e scava un breve cunicolo a fondo cieco (*4*). Nel disegno in basso (*5*) è raffigurato il nido in sezione.

Anche il nido d'incubazione di un'altra vespa della sabbia comune nell'Australia centrale, *atrifrons*, mostra uno schema caratteristico della specie. La sabbia estratta dalla tana viene dispersa lungo un vasto arco, ben lontano dall'entrata. Una piccola superficie, proprio di fronte all'entrata, viene completamente liberata da tutto il terriccio fresco. Sul lato opposto la femmina di *atrifrons* scava un disegno caratteristico a raggiera, costituito da linee che convergono verso l'entrata della tana.

Uno dei più strani tipi di comportamento nella costruzione del nido è quello di *littoralis*, una specie a vasta diffusione di cui abbiamo già parlato. Dopo aver completato la costruzione della tana, la femmina non disperde il monticello che ha accumulato, ma indietreggia a partire dall'imboccatura della tana su per il monticello, compie un giro di 90°, scende dal monticello e accumula altra sabbia sopra la costruzione. Poi vola fino all'entrata della tana e ripete tutta la precedente serie di movimenti: alla fine è riuscita a formare un crinale di sabbia elevato con un disegno di solchi su entrambi i lati (*si veda l'illustrazione a pagina 95*). Il crinale è lungo da 11 a 17 centimetri, largo da 4 a 7 e alto circa 2 centimetri.

Abbiamo osservato questo strano tipo di comportamento delle femmine di *littoralis* in tutta l'Australia centrale, occidentale e settentrionale. Invece lungo la costa orientale, dal Nuovo Galles del Sud fino al Queensland centrale, molte femmine di *littoralis* non accumulano affatto sabbia sopra il monticello, oppure lo fanno solo in grado limitato. Si deve far osservare che nelle zone dove le femmine di *littoralis* non costruiscono monticelli, non nidificano nemmeno accanto ad altre specie di *Bembex*. Nelle aree in cui i nidi di *littoralis* sono mescolati a quelli di altre specie, le femmine costruiscono nidi dotati della struttura caratteristica della specie *littoralis*.

Evidentemente quando parecchie specie di *Bembex* nidificano l'una accanto all'altra, esiste un certo vantaggio nel fatto di avere uno schema strutturale caratteristico all'entrata del nido, forse utile come punto di riferimento. D'altra parte molte specie di *Bembex* eliminano tutti i segni esterni che possono mettere in evidenza il loro nido, eppure sono sempre in grado di rintracciarlo.

La dispersione del monticello che si accumula durante lo scavo del cunicolo aveva in origine lo scopo di rendere difficile ai nemici naturali della vespa della sabbia di scoprire il nido. In Australia, come in altre parti del mondo, le vespe *Bembex* sono attaccate da parassiti e da altri animali che si cibano dei rifiuti del nido. Tra i nemici di *Bembex* vi sono le famiglie dei mutillidi (chiamate anche «formiche di velluto»), dei bombilidi, dei sarcofagidi e dei cloropidi. Le vespe della sabbia australiane rimangono inoltre spesso vittime dei coleotteri della famiglia degli stilopidi.

Le tane a fondo cieco del nido di *variabilis* vengono probabilmente costruite allo scopo di indurre in errore i parassiti. Abbiamo spesso osservato vari ditteri entrare e deporre uova in queste false aperture. Presumibilmente i caratteristici schemi costruttivi dei nidi di molte specie di *Bembex* hanno anche uno scopo protettivo contro i parassiti e i predatori. Si può affermare che le singole specie di *Bembex* si siano evolute per difendersi da un particolare nemico naturale predominante, e che ciascuna specie abbia sviluppato un modello di comportamento che riducesse la probabilità di successo da parte del nemico. Quando parecchie specie di *Bembex* nidificano accanto, la varietà di struttura dei nidi può impedire ai parassiti del nido e ai predatori di sviluppare reazioni specifiche verso ciascuna configurazione.

È chiaro che la varietà di tipi di comportamento che si può osservare nelle vespe della sabbia australiane è il risultato di molteplici pressioni selettive: la competizione per la preda, i nemici naturali e la presenza di nicchie ecologiche che in altre parti del mondo sono occupate da altri generi. Riteniamo che i periodi ricorrenti di estrema siccità in Australia possano aver obbligato le varie specie di *Bembex* in rifugi isolati, dove hanno sviluppato meccanismi di isolamento sessuale e differenze nel comportamento, che hanno reso loro possibile una coesistenza l'una accanto all'altra. Grazie a condizioni climatiche più favorevoli le vespe della sabbia australiane riuscirono a estendere la loro area vitale e continuarono a convivere là dove le condizioni ecologiche lo permettevano. I processi di adattamento tuttora evidenti in alcune specie, come *variabilis*, offrono un'occasione unica per studiare le pressioni selettive e l'origine e la diffusione di nuovi elementi nel comportamento di *Bembex*.

# GIOCHI MATEMATICI

*di Martin Gardner*

## *Sulla tassellatura del piano con poligoni convessi*

« Molti dei pavimenti e delle pareti dell'Alhambra in Spagna, decorati con piastrelle dai colori smaglianti, testimoniano l'abilità dei Mori nell'arte di ricoprire il piano con figure simili congiunte senza intervalli. Che peccato che la loro religione proibisse di rappresentare l'immagine umana! »

—M. C. ESCHER

Si supponga di disporre di una quantità infinita di pezzi di un rompicapo jigsaw tutti uguali fra loro. Se è possibile ricoprire il piano collocando i pezzi uno accanto all'altro, senza lasciare spazi vuoti e senza sovrapposizioni, diremo che quel tipo di pezzo satura il piano e lo schema risultante sarà detto tassellatura. Fino dai tempi più antichi tassellature di questo tipo sono state utilizzate per pavimentazioni e pareti e sono servite come motivi decorativi per mobili, tappeti, coperte, vestiti e altri oggetti. M.C. Escher, l'artista olandese recentemente scomparso, si divertiva a tassellare il piano con forme intricate rappresentanti uccelli, pesci, animali e altre creature viventi (*si veda la figura in basso*).

*Tassellatura di M. C. Escher.*

È chiaro che esistono infiniti pezzi di forma diversa che possono tassellare il piano, ma ponendo rigorose restrizioni il problema di classificare ed enumerare le tassellature diventa abbordabile. I geometri si sono interessati in modo particolare alle tassellature ottenute con pezzi poligonali; di queste anche le più semplici presentano difficili problemi. Questo mese ci limiteremo alla ricerca dei poligoni convessi capaci di saturare il piano. Questo problema rimase insoluto fino al 1967, quando Richard Brandon Kershner, ora vicedirettore dell'Applied Physics Laboratory della Johns Hopkins University, scoprì tre pentagoni che erano sfuggiti a tutti quelli che si erano occupati del problema prima di lui.

Iniziamo chiedendoci quanti sono i poligoni regolari capaci di saturare il piano. Come era già stato dimostrato dagli antichi greci, i poligoni regolari di questo tipo sono solo tre: il triangolo equilatero, il quadrato e l'esagono. La tassellatura esagonale, così familiare alle api, è uno schema fisso. Gli schemi ottenuti coi triangoli equilateri e coi quadrati possono dare luogo a un'infinità di variazioni facendo scivolare una sull'altra le righe di triangoli o di quadrati (*si veda l'illustrazione in alto nella pagina seguente*).

Se eliminiamo la restrizione che la tassellatura debba essere ottenuta con un poligono convesso regolare il problema diventa più interessante. Usando la famosa formula di Eulero $v-s+f=1$ (dove le lettere indicano rispettivamente il numero dei vertici, degli spigoli e delle facce di una figura poligonale) e degli strumenti elementari di analisi diofantea, non è difficile dimostrare che nessun poligono convesso avente più di sei lati è in grado di saturare il piano. La nostra ricerca si limita dunque ai poligoni di tre, quattro, cinque e sei lati.

Il caso del triangolo è facile. Ogni triangolo satura il piano, infatti basta congiungere due triangoli uguali in modo che combacino due lati corrispondenti, come mostrato a sinistra nella figura di mezzo della pagina seguente, per ottenere un parallelogramma. Disponendo i parallelogrammi uno di fianco all'altro si otterrà una striscia infinita coi lati paralleli, e collocando queste strisce una di fianco all'altra si satura il piano.

Il caso del quadrilatero è quasi altrettanto semplice, anche se il risultato è più sorprendente. Ogni quadrilatero satura il piano! Infatti si prendano come prima due quadrilateri identici e li si congiunga lungo due lati corrispondenti in modo che



uno sia capovolto rispetto all'altro; il risultato sarà un esagono (*si veda la figura in basso in questa pagina*). In un esagono di questo tipo i lati opposti sono sempre uguali e paralleli. L'esagono ottenuto può saturare il piano mediante una semplice operazione di traslazione (cioè mutando la sua posizione nello spazio ma non l'orientamento). Non è necessario che il quadrilatero sia convesso, dato che con la stessa tecnica si ottiene uno schema che satura il piano anche partendo da un quadrilatero non convesso.

Il caso dell'esagono fu risolto nel 1918 da K. Reinhardt nella sua tesi di dottorato presentata all'Università di Francoforte. Egli dimostrò che gli esagoni convessi capaci di saturare il piano si dividono in tre classi. Kershner, nel suo articolo *On Paving the Plane* (« APL Technical Digest », luglio, 1969) caratterizza le tre classi nel modo seguente.

Si contrassegnino i lati e gli angoli di un esagono come mostrato nella figura della pagina seguente. Un esagono convesso saturerà il piano se e solo se appartiene a una delle tre classi seguenti:

1. $A+B+C=360°$ e $a=d$.
2. $A+B+D=360°$ e $a=d$, $c=e$.
3. $A=C=E=120°$ e $a=b$, $c=d$, $e=f$.

La figura mostra un esempio di esagono convesso per ognuna delle tre classi e una parte del rispettivo schema di saturazione. Le linee colorate delimitano la « regione fondamentale » con cui si satura il piano mediante traslazione. Si osservi che l'esagono di tipo 2, quando è asimmetrico, richiede anche l'operazione di riflessione.

In modo analogo è possibile catalogare otto tipi di pentagoni convessi capaci di saturare il piano. Le prime cinque classi furono scoperte da Reinhardt. Kershner le descrive nel modo seguente, dopo aver assegnato lettere ad angoli e lati del pentagono come mostrato a pagina 101. Un pentagono convesso satura il piano se e solo se appartiene a una o più delle classi seguenti:

1. $A+B+C=360°$
2. $A+B+D=360°$ e $a=d$.
3. $A=C=D=120°$ e $a=b$, $d=c+e$.

*I tre poligoni regolari che saturano il piano.*

*Qualsiasi triangolo satura il piano.*

*Qualsiasi quadrilatero satura il piano.*

4. $A=C=90°$
e $a=b$, $c=d$.

5. $A=60°$, $C=120°$
e $a=b$, $c=d$.

Nella figura viene mostrato un esempio per ogni tipo unitamente allo schema di saturazione risultante, dove le linee colorate evidenziano la regione fondamentale. La riflessione è richiesta solo dal tipo 2.

« A questo punto – scrive Kershner – Reinhardt fu tratto in inganno o dalla sua tecnica o dalla sua risolutezza, e concluse la tesi affermando che sebbene in linea di principio fosse possibile analizzare tutti i pentagoni seguendo la linea delle considerazioni sviluppate, sarebbe stato molto noioso e ci sarebbe sempre stata la possibilità che non emergesse nessun tipo nuovo. In realtà tutti quelli che lavoravano nel settore erano convinti che la lista dei pentagoni fosse probabilmente completa. »

« Per ragioni che sarebbe difficile spiegare sono rimasto impigliato in questo problema per circa 35 anni. Ogni cinque o dieci anni cercavo di risolverlo, finché due anni fa circa trovai un modo per classificare i pentagoni che era più conveniente di quello di Reinhardt e che rendeva possibile un'analisi completa (anche se la completezza la si raggiunge per un soffio). Il risultato delle mie ricerche fu la scoperta di tre ulteriori categorie di pentagoni... capaci di saturare il piano. Gli schemi ottenuti sono assolutamente sorprendenti e la scoperta della loro esistenza fu per me una notevole soddisfazione. »

I tre tipi addizionali (*si veda la figura in alto di pagina 102*) sono descritti da Kershner nel modo seguente (i tipi 7 e 8 richiedono la riflessione):

6. $A+B+D=360°$, $A=2C$
e $a=b=e$, $c=d$.

7. $2B+C=2D+A=360°$
e $a=b=c=d$.

8. $2A+B=2D+C=360°$
e $a=b=c=d$.

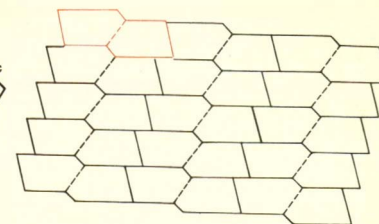
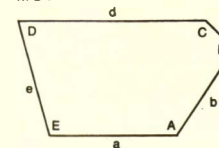
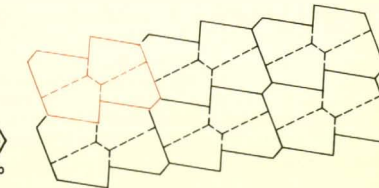
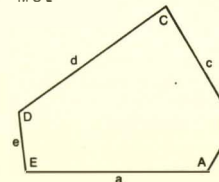
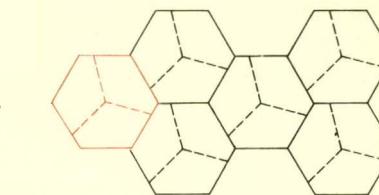
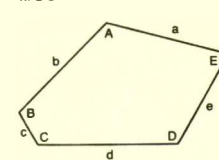
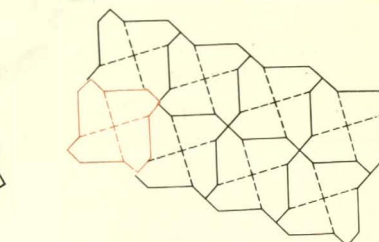
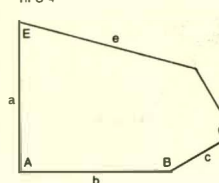
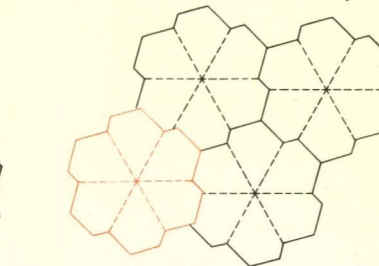
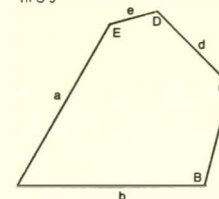
L'articolo di Kershner non comprende una dimostrazione del fatto che non esistono altri pentagoni convessi capaci di saturare il piano, « per l'ottima ragione – scrive il curatore nella nota introduttiva – che una dimostrazione completa richiederebbe un libro piuttosto grosso ». Si osservi che Kershner ha disegnato i suoi schemi valendosi appositamente di poligoni il più possibile irregolari, entro i limiti del tipo rispettivo, per mettere in luce la natura profonda della tassellatura. La tassellatura esagonale più regolare è ovviamente quella a nido d'ape e si vede subito che essa appartiene a tutti e tre i tipi di esagono.

Se si bisecano gli esagoni regolari ne risulta uno schema pentagonale che appartiene al tipo 1 (*si veda « a » nella figura in basso della pagina seguente*). Lo schema formato da sei pentagoni a fiore (« *b* ») appartiene al tipo 1, 5 e 6. Il più notevole di tutti gli schemi pentagonali è una tassellatura di pentagoni *equilateri* (« *c* »), che appartiene unicamente al tipo 1. Si osservi come sia possibile raggruppare in due modi differenti quadruple di questi pentagoni in modo da formare esagoni oblunghi, dove ogni insieme tassella il piano ad angolo retto rispetto all'altro. Questa splendida tassellatura è usata spesso nella pavimentazione delle vie del Cairo e compare talvolta come motivo fondamentale negli edifici moreschi.

Il pentagono equilatero si costruisce facilmente con riga e compasso (*si veda la figura di pagina 103*). Innanzitutto si tracci un lato $AB$ del pentagono. Si conduca quindi la perpendicolare nel punto medio $CD$ e quindi le linee $CE$ e $CF$ formanti con $AB$ angoli di 45°. Puntando in $A$ con raggio $AB$ si tracci un arco di circonferenza che taglierà $CE$ in $P$. Dall'altro lato si ripeterà la stessa costruzione: puntando in $B$ taglieremo la linea $CF$ in $R$. Sempre con apertura $AB$ si punti in $R$ e si tracci un arco che taglia $CD$ in $Q$.

Gli angoli del pentagono in $P$ e $R$ sono retti. L'angolo in $Q$ è un po' maggiore di 131 gradi, e gli angoli in $A$ e in $B$ sono un po' maggiori di 114 gradi. La distanza tra $Q$ e $B$ è uguale al prodotto del lato del pentagono per $\sqrt{2}$. L'area del pentagono (lo si dimostra facilmente) è esattamente uguale al quadrato di $CR$.

Tra le infinite tassellature del piano che si possono ottenere con poligoni congruenti non convessi, la geometria combinatoria ha dedicato particolare attenzione in questi ultimi anni a quelle ottenute coi polimini e coi loro cugini, i polimondi e i poliexi. (I polimini si ottengono con l'unione di più quadrati unitari, i polimondi con l'unione di triangoli equilateri e i poliexi con l'unione di esagoni regolari.) A questo proposito sono stati formulati diversi affascinanti problemi, alcuni risolti e

*I tre tipi di esagono convesso che saturano il piano.*

*I cinque tipi di pentagono convesso che saturano il piano noti nel 1918.*

# ECOLOGIA

**LE SCIENZE**
*edizione italiana di*
**SCIENTIFIC AMERICAN**

*ha finora pubblicato su questo argomento i seguenti articoli:*

**CIRCOLAZIONE GLOBALE DELL'INQUINAMENTO ATMOSFERICO**
*di R.E. Newell (n. 32)*

**INQUINAMENTO DA MERCURIO**
*di L.J. Goldwater (n. 36)*

**L'ECOSISTEMA DEL PARCO DI SERENGETI**
*di R.H.V. Bell (n. 38)*

**I MODELLI MATEMATICI E L'AMBIENTE NATURALE**
*di R. Pennacchi (n. 45)*

**I CRATERI DELL'INDOCINA**
*di A.H. Westing e E.W. Pfeiffer (n. 48)*

**ENERGIA « PULITA » DA COMBUSTIBILI « SPORCHI »**
*di A.M. Squires (n. 53)*

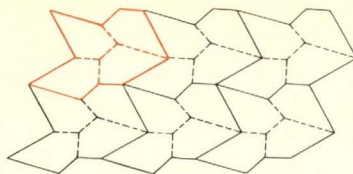
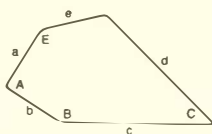
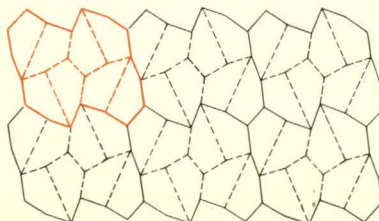
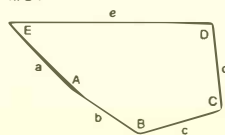
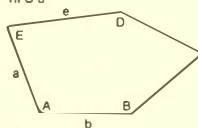
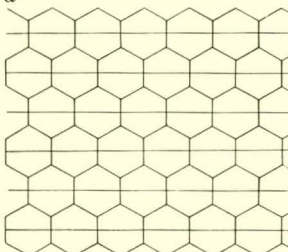
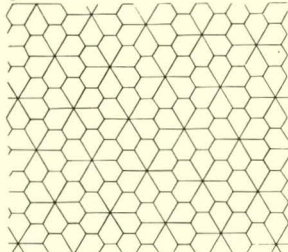
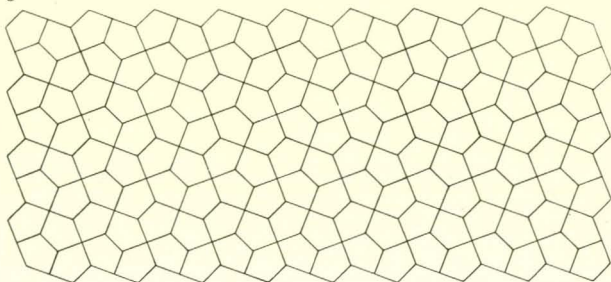
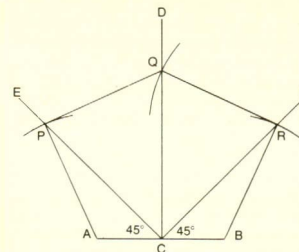
**IL GRANDE DIBATTITO SUL BANDO AGLI ESPERIMENTI NUCLEARI**
*di H.F. York (n. 54)*

**IL CONTROLLO DEL CICLO DELL'ACQUA**
*di J.P. Peixoto e M. Ali Kettani (n. 59)*

**LA CRISI DELL'ACCIUGA PERUVIANA**
*di C.P. Idyll (n. 62)*

**LA FORESTA PLUVIALE TROPICALE**
*di P.W. Richards (n. 67)*

**L'OCEANO AL CONFINE CON L'ATMOSFERA**
*di F. MacIntyre (n. 72)*

**L'ELIMINAZIONE DEI RIFIUTI NELL'OCEANO**
*di W. Bascom (n. 76)*

*Tre nuovi tipi di pentagono convesso che saturano il piano scoperti nel 1967.*

*Tassellature pentagonali insolitamente simmetriche.*

*Costruzione del pentagono equilatero che satura il piano.*

altri no, che verranno discussi il mese prossimo.

Ecco le risposte al problema di cartografia posto il mese scorso. Un planisfero equidistante da due punti, quando i due punti in questione sono uno agli antipodi dell'altro, è una linea retta. L'altro problema riguardava la distribuzione dei continenti nel mondo. Se si distribuiscono in modo casuale sul globo una, due o tre calotte circolari non sovrapponentisi, la probabilità che i loro centri giacciano tutti in un emisfero (cioè in una metà della sfera; non deve necessariamente coincidere con l'Emisfero Nord o quello Sud) è pari a 1.

Le risposte alle domande di geografia sono le seguenti: 1. Oceano Pacifico. 2. Canada. 3. California. 4. Venezia. 5. Vladivostok. 6. Giappone. 7. Arizona, Colorado, Nuovo Messico, Utah. 8. Est.

Nel fascicolo di gennaio è stata riportata quella che sembrava essere una seconda soluzione del problema di scacchi presentato nel mese di novembre. Come alcuni lettori hanno sottolineato, si tratta di una soluzione sbagliata. Infatti la quarta mossa non è uno scacco matto, dato che il Bianco può interporre un pedone tra la donna del Nero e il suo re con la mossa g2-g4. La soluzione originale è quindi unica. Sempre riguardo ai problemi del mese di novembre va segnalato l'errore contenuto nella successione di anni del nostro secolo che sono autonumeri: 1908 non è un autonumero dato che è generato da 1890, come mostra l'algoritmo presentato nel mese di dicembre. Nell'articolo del mese di dicembre ho trascurato di spiegare come l'applicazione delle matrici di Hadamard ai codici telemetrici sia dovuta a Golomb, che ha collaborato col Jet Propulsion Laboratory del California Institute of Technology in occasione della progettazione di varie sonde Mariner.